

**ZUR DAUERHAFTIGKEIT VON
OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEMEN
FÜR DIE ERHALTUNG VON
BETONBAUWERKEN**

Habilitationsschrift

zur Erlangung der Venia Legendi

vorgelegt

der Fakultät für Bauingenieurwesen

der RWTH Aachen University

von

Dr.-Ing. Jeanette Orlowsky

aus Vechta

Aachen, Februar 2012

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	1
1.1 Relevanz des Oberflächenschutzes	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	3
1.4 Vorgehensweise	4
2. Grundlagen zum Schutz von Betonoberflächen	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme.....	7
2.2.1 Allgemeines.....	7
2.2.2 Einwirkungen von außen	8
2.2.3 Einwirkungen aus dem Betonuntergrund.....	13
2.3 Adhäsion von Oberflächenschutzsystemen auf Beton	16
2.3.1 Allgemeines.....	16
2.3.2 Adhäsionsmechanismen.....	16
2.4 Materialien für den Oberflächenschutz	19
2.4.1 Allgemeines.....	19
2.4.2 Polymere.....	20
2.4.3 Siliziumorganische Verbindungen.....	29
2.4.4 Zementgebundene Systeme	31
2.4.5 Glas	33
2.5 Gegenüberstellung der klassischen Oberflächenschutzsysteme	35
2.6 Brückenabdichtungen	41
3. Schäden an OS-Systemen und Prüfmethode n	43
3.1 Allgemeines	43

3.2	Schadensmechanismen	46
3.2.1	Chemisch	46
3.2.2	Chemisch/Biologisch	51
3.2.3	Physikalisch	51
3.2.4	Mechanisch	53
3.2.5	Chemisch/Physikalisch/Mechanisch	54
3.3	Vermeidung von Schäden	58
3.3.1	Allgemeines	58
3.3.2	Anforderungen an den Untergrund	58
3.3.3	Witterung bei der Ausführung von Applikationen	62
3.3.4	Materialien, Aufbau der OS-Systeme, Schichtdicken	62
3.4	Prüfverfahren	64
3.4.1	Allgemeines	64
3.4.2	Bewitterung	64
3.4.3	Prüfverfahren mit Medienbeanspruchung	69
3.4.4	Prüfverfahren mit mechanischer Beanspruchung	71
3.4.5	Prüfverfahren zur Materialanalyse ohne Materialbeanspruchung	77
4.	Unilaterale NMR als zerstörungsfreie Prüfmethode	81
4.1	Die NMR-MOUSE als unilaterale NMR	81
4.1.1	NMR Messprinzip	81
4.1.2	NMR-MOUSE	82
4.1.3	Messwerte – Relaxationszeiten T_1 und T_2	84
4.1.4	Datenanalyse	87
4.2	Einfluss der Betonstahlbewehrung	89
4.2.1	Allgemeines	89
4.2.2	Versuchsaufbau und untersuchte Parameter	89
4.2.3	Ergebnisse	91
4.2.4	Schlussfolgerungen	97
4.2.5	Übertragbarkeit der Untersuchungen auf die Schichtdickenmessung	98
4.2.6	Zusammenfassung zum Einfluss der Stahlbetonbewehrung	100
4.3	Einfluss der Temperatur	100
4.4	Einfluss der Probenausrichtung und Probenrauheit	101
4.5	Messgenauigkeit bei der Schichtdickenbestimmung	102
4.5.1	Allgemeines	102
4.5.2	Schichtdickenmessungen an zwei Modellsystemen	103
4.5.3	Schichtdicken zweier OS 11a-Systeme	105

4.5.4	Schlussfolgerungen zur Messgenauigkeit bei der Schichtdickenbestimmung	108
5.	Nicht befahrbare Oberflächenschutzsysteme.....	111
5.1	Allgemeines	111
5.2	Hydrophobierungen	111
5.2.1	Allgemeines.....	111
5.2.2	Eindringtiefe	113
5.2.3	Dauer der Wirksamkeit von Hydrophobierungen	116
5.3	Oberflächenschutzsysteme auf Dispersionsbasis	126
5.3.1	Untersuchte Dispersionen	126
5.3.2	Ergebnisse einer 12jährigen Auslagerung an verschiedenen Standorten....	127
5.3.3	Materialveränderungen nach unterschiedlichen Laborbewitterungen.....	132
5.3.4	Schlussfolgerungen	138
5.4	Elastische Dichtungsschlämmen als Oberflächenschutzsysteme	139
5.4.1	Untersuchte elastische Dichtungsschlämmen	139
5.4.2	Durchgeführte Freibewitterungen und Untersuchungen.....	140
5.4.3	Untersuchungsergebnisse	141
5.4.4	Schlussfolgerungen	145
6.	Befahrbare Oberflächenschutzsysteme	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Langfristige Haftung des OS 7 bzw. Teilbereiche einer Brückenabdichtung ..	147
6.2.1	Einfluss des Thermoschocks.....	147
6.2.2	Einfluss rückseitiger Durchfeuchtung.....	149
6.2.3	Einfluss von in Rissen anstehendem Wasserdruck.....	154
6.3	Zustandsuntersuchungen an Parkhausbeschichtungen	155
6.3.1	Allgemeines.....	155
6.3.2	Erscheinungsbilder	156
6.3.3	CO ₂ Eindringwiderstand	159
6.3.4	Chlorideindringen.....	159
6.3.5	Korrosionszustand der Bewehrung in Rissen.....	161
6.3.6	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen.....	162
6.4	Schlussfolgerungen	163
7.	Anorganische Oberflächenschutzsysteme.....	165
7.1	Allgemeines	165

7.2	Oberflächenschutz mit Glas	165
7.2.1	Problemstellung	165
7.2.2	Vorstellung der beiden Glassysteme	166
7.2.3	Leistungsfähigkeit der Glassysteme	167
7.2.4	Pilotprojekt Abwasserkanal	169
7.2.5	Zusammenfassung	173
7.3	Oberflächenschutz mit Textilbetonen	174
7.3.1	Allgemeines	174
7.3.2	Materialien	175
7.3.3	Textilbewehrte Spritzmörtelschichten zur Instandsetzung von Wasserbauwerken	178
7.4	Schlussfolgerungen	187
8.	Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Arbeit und Ausblick	189
9.	Zusammenfassung	195
10.	Schriftenverzeichnis	199
10.1	Literatur	199
10.2	Normen	211

1. EINLEITUNG

1.1 RELEVANZ DES OBERFLÄCHENSCHUTZES

Die Erhaltung von Betonbauwerken stellt ein vergleichsweise junges Gewerk dar. Um 1960 wurden erste nennenswerte Schäden an Betonbauteilen infolge Bewehrungskorrosion dokumentiert. Die rapide Zunahme dieser Schäden führte seit 1975 zu erheblichen Aufwendungen beim Erhalt der Stahlbetonbauwerke. Während das Neubauvolumen in den vergangenen Jahren kontinuierlich abnimmt, steigen in gleicher Größenordnung die Maßnahmen im Bestand */DIW08/*, */Bre05/*. Da die bestehenden Gebäude zunehmend älter werden, wird diese Entwicklung anhalten. Ein signifikanter Teil der Kosten entfällt dabei auf den Erhalt und die Instandsetzung von Betonbauteilen. Allein die Ausgaben für Arbeiten zur Betoninstandsetzung im Bereich der deutschen Bundesfernstraßen beliefen sich im Jahr 2007 auf 82 Mio. €, was rd. 22 % des Gesamt-Erhaltungsaufwandes entspricht */Haa09/*. Die Erhaltung der Bausubstanz hat sich somit zu einem bedeutsamen Wirtschaftsfaktor entwickelt.

Hauptursache für Schäden an Betonbauwerken ist die Korrosion der Stahlbewehrung. Sie wird durch die zwei folgenden Vorgänge eingeleitet:

- Karbonatisierung des Betons bis zur Bewehrung,
- Eindringen von Chloriden bis zur Bewehrung.

Mit der Korrosion der Stahlbewehrung sind häufig Rissbildungen und Betonabplatzungen verbunden. Darüber hinaus kann der Beton mechanisch, chemisch und physikalisch geschädigt werden. Ursachen hierfür sind zum Beispiel Schlagbeanspruchungen, Setzungen, Alkalitreiben, biogene Schwefelsäurekorrosion, thermische Zwängungen, Schwinden, Verschleiß und Frost-Tau-Wechsel.

Der Einsatz von Oberflächenschutzsystemen ist ein bedeutender Baustein zur Erhaltung von Betonbauwerken. Unter dem Begriff Oberflächenschutzsystem werden eine Vielzahl an Typen und Aufbauten polymerhaltiger Beschichtungen zusammengefasst. Aber auch anorganische Materialien wie Mörtel und Glas sowie siliziumorganische Verbindungen werden innerhalb von Oberflächenschutzsystemen eingesetzt. Oberflächenschutzsysteme dienen zum Schutz von Beton- und Stahlbetonbauteilen. Sie sind entweder eigenständige Maßnahmen oder Bestandteil umfassender Instandsetzungsarbeiten. Folgende wesentliche Ziele können mit dem Einsatz von Oberflächenschutzsystemen erreicht werden:

- Schutz des Betons gegen eindringende Stoffe wie z. B. Wasser, Chloride, Kohlenstoffdioxid.
- Austrocknung des Betons, indem Wasserzutritt in den Beton verhindert wird aber gleichzeitig ein Feuchtetransport aus dem Beton durch die Beschichtung möglich ist.
- Erhöhung des Widerstandes gegen Chemikalien und/oder mechanischen Angriff.

Neben diesen Zielen, die die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit betreffen, werden auch Ziele zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit verfolgt (Farbgestaltung, Reinigungsfähigkeit, Rutschsicherheit

etc.). Aus den breitgefächerten Zielen und den verschiedensten Aufbauten bzw. Materialkombinationen von Oberflächenschutzsystemen resultiert ein großer Anwendungsbereich und damit verbunden ein hohes Bauvolumen für Oberflächenschutzsysteme in der Erhaltung von Betonbauwerken.

1.2 PROBLEMSTELLUNG

Effektivität und Dauerhaftigkeit der Oberflächenschutzsysteme hängen maßgeblich von der Art des Systems (Materialauswahl), den Applikationsbedingungen, der Ausführungsqualität und den Umgebungsbedingungen ab. Um die langfristige Effektivität von Oberflächenschutzsystemen beurteilen zu können, sind folgende Kenntnisse von Bedeutung:

- Zeitabhängiges Materialverhalten,
- Schichtdicken der applizierten Beschichtungen bzw. Eindringtiefen von Hydrophobierungen,
- Adhäsion zum Untergrund,
- Chemische und mechanische Widerstandsfähigkeit der Systeme,
- Schutzwirkung der Beschichtung/Hydrophobierung gegenüber Wasser, Chloriden und Kohlenstoffdioxid,
- Austrocknungsverhalten des Betons durch ein Oberflächenschutzsystem hindurch.

Grundlegendes Wissen zum zeitabhängigen Materialverhalten der verwendeten Polymere und siliziumorganischen Verbindungen fehlt bis heute ebenso wie funktionale Zusammenhänge zwischen Schichtdicken, Widerstandsfähigkeit, Schutzwirkung und Austrocknungsverhalten. Nach einem mittlerweile 20 bis 25jährigem Einsatz der Oberflächenschutzsysteme existieren lediglich punktuelle Forschungsarbeiten zu diesem Themengebiet. Gründe hierfür sind:

- Die Komplexität und Vernetzung der genannten Faktoren. Aufgrund der Vielzahl an Oberflächenschutzsystemen, Betonuntergründen, Ausführungsmöglichkeiten und Umgebungsbedingungen wurden bisher nur Fallbeispiele betrachtet.
- Die kontinuierliche Veränderung der Produkte mit ihren zahlreichen Zusätzen durch Hersteller und Formulierer sowie deren oftmals als „Firmengeheimnis“ eingestufte Zusammensetzung, erschweren Studien über Schädigungsmechanismen bei den Polymeren.
- Da das Themengebiet vergleichsweise jung ist, gibt es nur wenige Langzeitstudien.
- Die existierenden Prüfmethode sind unzureichend. Die Übertragbarkeit beschleunigter Laborbewitterungen auf Freibewitterungen ist unklar. Sensitive Prüfmethode zur frühzeitigen, zuverlässigen Messung von Veränderungen in den Schichten der applizierten Oberflächenschutzsysteme existieren nicht bzw. wurden bisher aufgrund ihrer Komplexität nicht angewandt. Ebenso fehlen zerstörungsfreie Prüfmethode zur Untersuchung von Schichtdicken, Materialveränderungen und Transportprozessen in den Oberflächenschutzsystemen. Dadurch ist keine kontinuierliche Verfolgung von Veränderungen an definierten Messstellen möglich.

Solange die Grundlagenkenntnisse und Prüfmethode fehlen, existiert auch keine Basis für die Entwicklung von Modellen zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Oberflächenschutzsystemen. Damit verbunden ist, dass konkrete Aussagen zur Nachhaltigkeit von Erhaltungsmaßnahmen an Betonbauwerken bislang nicht möglich sind.

Der unbekannt, aber begrenzten Dauerhaftigkeit bisheriger Oberflächenschutzsysteme kann na-

türlich auch durch die Entwicklung neuer Verfahren zum Schutz von Betonoberflächen entgegengetreten werden. Aufgrund fehlender Industrieforschung und wirtschaftlicher Zwänge wurde in den vergangenen Jahren die Materialbasis jedoch kaum modifiziert.

1.3 ZIELSETZUNG

Ziel der Habilitation ist die Erarbeitung von „Werkzeugen“, mit deren Hilfe langfristig die objektspezifische Lebensdauerbemessung von Oberflächenschutzsystemen möglich wird. Die „Werkzeuge“ gliedern sich in Grundlagenwissen, Prüfmethode und Verfahren.

Die Arbeitsgruppe „Erhaltung und Instandsetzung“ (ehemals „Beschichtung und Adhäsion“) am Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen University arbeitet seit Jahrzehnten auf dem Themengebiet der Oberflächenschutzsysteme zur Erhaltung von Betonbauwerken. Weltweit gibt es keine andere Forschergruppe, die dieses Thema derart intensiv bearbeitet hat. Am ibac wurden zahlreiche Forschungsvorhaben, auch Langzeitstudien, zur Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen durchgeführt. Dabei handelt es sich überwiegend um eigenständige Fallstudien in denen ausgewählte Parameter betrachtet wurden. Im Rahmen dieser Habilitation werden die im Laufe meiner Mitarbeit am ibac in der Arbeitsgruppe durchgeführten Projekte erstmalig übergreifend ausgewertet und miteinander vernetzt, um damit Aussagen zur Dauerhaftigkeit zu ermöglichen.

Zudem ist auch die Einführung einer neuen, zerstörungsfreien Prüfmethode zur Untersuchung von Oberflächenschutzsystemen erforderlich. Mit dieser Methode sollen die Schichtdicken mehrlageriger Beschichtungen bzw. die Eindringtiefen von Hydrophobierungen aber auch Materialveränderungen und Transportprozesse untersucht werden. Die zerstörungsfreien Messungen sollen Untersuchungen in definierten Zeitabständen an denselben Messstellen ermöglichen. Langfristig wird auch die Anwendung der Prüfmethode am Bauwerk angestrebt.

Zugleich sollen im Rahmen der Arbeit neue Verfahren zum Schutz von Betonoberflächen mit anorganischen Materialien erarbeitet werden. Die vergleichsweise hohe Dauerhaftigkeit anorganischer Baustoffe sowie die hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer bzw. chemischer Beanspruchungen kann in bestimmten Bereichen eine Alternative zu den bisher dort eingesetzten Oberflächenschutzsystemen darstellen.

Bild 1–1 verdeutlicht nochmals das Ziel der Arbeit. Die übergreifende Auswertung und Vernetzung der Forschungsprojekte steht im Vordergrund. Die Notwendigkeit der Einführung einer neuen Prüfmethode resultiert aus dem in den Forschungsprojekten erkannten Bedarf. Die neue Prüfmethode soll einerseits zur weiteren Analyse von Proben/Versuchsdaten herangezogen, andererseits aber auch für zukünftige Arbeiten zur Verfügung gestellt werden. Die Forschungsvorhaben haben zudem gezeigt, dass das Spektrum an Oberflächenschutzsystemen um weitere Verfahren zu erweitern ist. Denn zur Gewährleistung dauerhafter Oberflächenschutzsysteme müssen Materialien und Verfahren zur Verfügung gestellt werden, die auch bei Betonuntergründen minderer Qualität bzw. starker chemischer Beanspruchung ausreichend Potential aufweisen.

Die Realisierung des Ziels dieser Habilitation erlaubt im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben Modelle zur objektspezifischen Dauerhaftigkeitsbemessung zu erarbeiten. Langfristig wird dadurch eine objektspezifische Quantifizierbarkeit der Lebensdauer von Oberflächenschutzsystemen möglich.

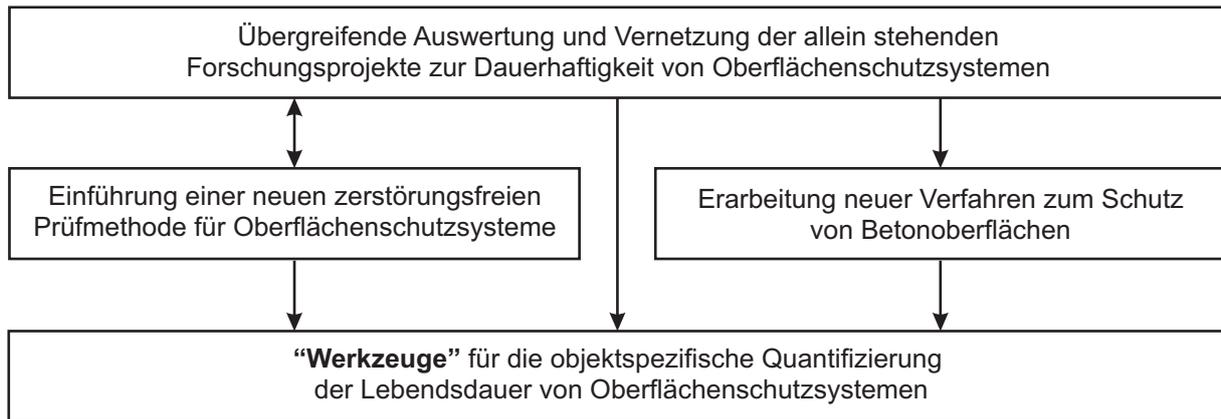


Bild 1-1: Ziel der Habilitation

1.4 VORGEHENSWEISE

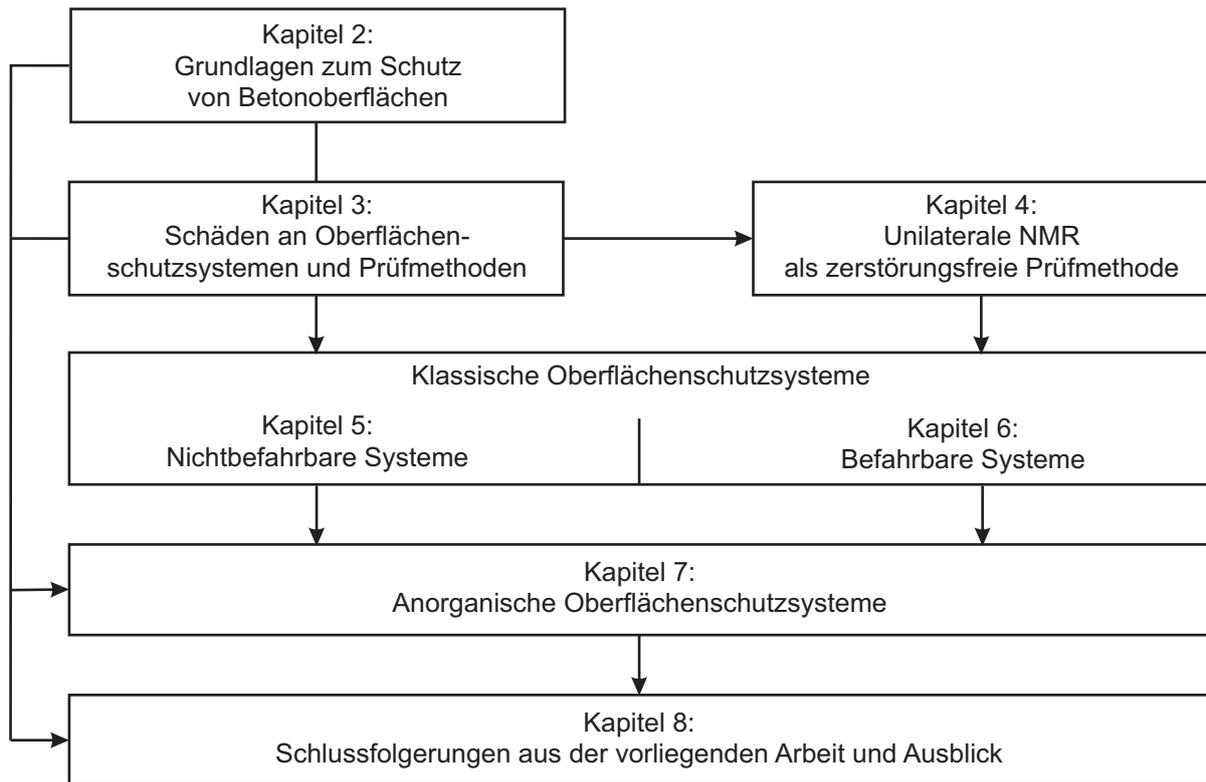
Bild 1-2 zeigt in einer Übersicht die zur Erreichung des beschriebenen Ziels der Arbeit gewählte Vorgehensweise. Die Ausgangsbasis bildet das Kapitel 2 mit den Grundlagen zum Schutz von Betonoberflächen. Hier werden die Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme erläutert, die Relevanz der Adhäsion von Oberflächenschutzsystemen zum Betonuntergrund dargestellt, die Materialien für den Oberflächenschutz beschrieben und die klassischen Oberflächenschutzsysteme gegenübergestellt. Nach der Diskussion der bekannten Schadensmechanismen erfolgt abschließend im Kapitel 3 die Beschreibung der etablierten Prüfmethode.

Die unilaterale NMR wurde erstmalig als zerstörungsfreie Prüfmethode für Oberflächenschutzsysteme angewendet. Dazu war die Erarbeitung einer Methode, die Untersuchung von Einflussgrößen auf das NMR-Signal und die Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Messtechnik im Hinblick auf die zu untersuchenden Fragestellungen erforderlich. Dies ist der Inhalt von Kapitel 4.

Die Dauerhaftigkeit klassischer Oberflächenschutzsysteme nach der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (RL-SIB, /DAf01/) wird in den Kapiteln 5 und 6 bearbeitet. Dabei wird nach nicht befahrbaren und befahrbaren Oberflächenschutzsystemen differenziert.

Kapitel 7 beinhalten die neuen anorganischen Oberflächenschutzsysteme mit ihrem hohen Dauerhaftigkeitspotential. Hierbei wird auf den Oberflächenschutz mit Glas und mit Textilbeton eingegangen.

Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Arbeit und die daraus resultierenden Ausblicke werden in Kapitel 8 dargestellt. Kapitel 9 fasst die Habilitationsschrift nochmals zusammen.

**Bild 1–2:** Vorgehensweise

2. GRUNDLAGEN ZUM SCHUTZ VON BETONOBERFLÄCHEN

2.1 ALLGEMEINES

Um die Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen erfassen und beschreiben zu können, müssen zunächst die Einflussgrößen bekannt sein. Einflüsse resultieren aus den Einwirkungen, der Adhäsion zum Untergrund sowie ggf. zwischen den Materialschichten mehrlagiger Systeme, den Materialien und dem Aufbau von Oberflächenschutzsystemen. Diese Themen werden in den Abschnitten 2.2 bis 2.5 behandelt. Mögliche Schäden an Oberflächenschutzsystemen, die aus den zuvor beschriebenen Einflüssen entstehen, werden im Kapitel 3 dargestellt.

Die nachfolgenden Abschnitte 2.3 bis 2.5 beinhalten zum Teil Auszüge aus */Rau08/*, dem gemeinsam mit Prof. Raupach verfasstem Buch „Erhaltung von Betonbauwerken“. Dementsprechend können weitergehende Angaben zur Adhäsion, den Materialien sowie Aufbau, Verarbeitung und Eigenschaften von Oberflächenschutzsystemen dieser Literatur */Rau08/* entnommen werden.

2.2 EINWIRKUNGEN AUF OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

2.2.1 ALLGEMEINES

Oberflächenschutzsysteme erfahren von beiden Seiten (außen und innen) Einwirkungen. In Bild 2-1 sind sowohl die äußeren als auch die inneren Einwirkungen skizzenhaft dargestellt. Häufig resultieren aus äußeren Einwirkungen auch Einwirkungen aus dem Betonuntergrund. So wirken die Lufttemperatur und Wärmestrahlung zum einen unmittelbar auf das Oberflächenschutzsystem und zum anderen können sie Volumenänderungen des Betons bedingen. Diese Volumenänderungen wirken dann wiederum ebenfalls auf das Oberflächenschutzsystem ein. Die Konsequenzen der nachfolgend beschriebenen Einwirkungen werden in Kapitel 3 erläutert.

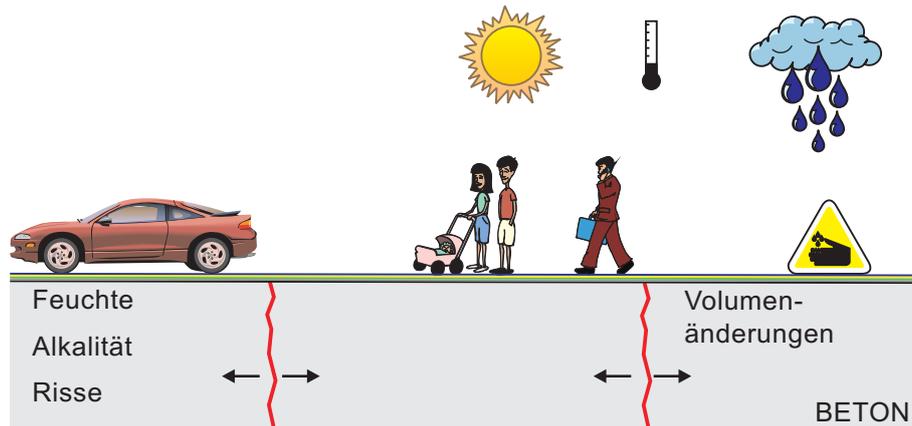


Bild 2-1: Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme

2.2.2 EINWIRKUNGEN VON AUSSEN

Die äußeren Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme resultieren aus der Luft, dem Klima, mechanischen Beanspruchungen sowie Chemikalien. Im Folgenden werden die vier genannten, äußeren Einwirkungen diskutiert.

EINWIRKUNGEN AUS DER LUFT

Die Luft besteht im Wesentlichen aus den zwei Gasen Stickstoff (~78 %) und Sauerstoff (~21 %). Des Weiteren sind die Schadgase Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Stickstoffmonoxid (NO) und Ozon (O_3) enthalten. Insbesondere die Immissionskonzentration des Schwefeldioxids hat in den vergangenen 30 Jahren deutlich abgenommen (von $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1981 auf $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2010) /LAN10/. Aber auch Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid sind rückgängig. Demgegenüber ist die Ozonkonzentration in den letzten 30 Jahren angestiegen, wobei seit einigen Jahren der Verlauf stagniert. Ausführliche Angaben können dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW sowie dem Deutschen Wetterdienst entnommen werden. Tab. 2-1 gibt die Jahreskenngrößen für 2010 bzgl. der Immissionskonzentrationen wieder. Es sind jeweils die Mittelwerte und 98 %-Werte aus Halbstundenwerten aufgetragen. Die Daten der Rhein-Ruhr-Stationen ergeben sich aus 24 Stationen im Rhein-Ruhr-Gebiet, die der Waldstationen aus den zwei Messstationen Simmerath Eifel und Nepthen Rothaargebirge. Die Verkehrsstation befindet sich in Essen-Ost.

Tab. 2-1: Immissionskonzentrationen im Jahr 2010 für Schwefel-, Stickstoffdioxid, Stickstoffmonoxid und Ozon /LAN10/

Schadgas	Einheit	Rhein-Ruhr		Verkehrsstation		Waldstationen	
		MW	98 %	MW	98 %	MW	98 %
Schwefeldioxid	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	6	31	-	-	-	-
Stickstoffdioxid		30	73	43	89	8	33
Stickstoffmonoxid		12	96	27	134	1	5
Ozon		37	122	-	-	60	136

MW: Mittelwerte; 98 %: 98 %-Werte aus Halbstundenwerten bzw. bei Ozon aus Stundenmittelwerten

Weiterer Bestandteil der Luft ist Kohlenstoffdioxid. Derzeit (2011) kommt er in einer mittleren Konzentration von 0,039 Vol.-% (390 ppm) vor. Entsprechend der Keeling Kurve stieg die Konzentration

an Kohlenstoffdioxid in den vergangenen 50 Jahren exponentiell an /Kee05/ (<http://scrippsco2.ucsd.edu/>). Bei Werten unter 800 ppm gilt die Raumluftqualität als gut, Werte zwischen 800 und 1400 ppm gelten als mittel bis mäßige Qualität. Neben Wasserdampf hat Kohlenstoffdioxid den größten Anteil am Treibhauseffekt und ist damit ein Treibhausgas. Treibhausgase sind durchgängig für die kurzwellige einfallende Sonnenstrahlung, langwellige Wärmestrahlung wird von ihnen absorbiert und emittiert. So wird weniger Wärme von der Erde in das Weltall zurückgestrahlt. Je höher die Konzentration der Treibhausgase ist, desto stärker wird der Treibhauseffekt. Weitere Treibhausgase sind Ozon, Methan und Lachgas sowie fluorierten Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid.

EINWIRKUNGEN AUS DEM KLIMA

Die Globalstrahlung beinhaltet die gesamte auf eine horizontale Empfangsfläche der Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung. Sie setzt sich zusammen aus der auf direktem Weg eintreffenden Solarstrahlung und der Strahlung, die über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreicht (Diffusstrahlung). Zur Messung des Momentanwerts der Globalstrahlung dienen Pyranometer. Dieser Momentanwert hat die Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Tageseinträge werden in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ angegeben, Jahreseinträge in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die Momentanwerte der Globalstrahlung unterliegen wetterbedingt starken Schwankungen (Bewölkung, atmosphärische Trübung). Aufgrund des veränderlichen Einfallswinkels des Direktstrahlungsanteils ist die Globalstrahlung mittags stärker als morgens und abends, und im Sommer stärker als im Winter. Die Jahreseinträge steigen mit zunehmender Nähe zum Äquator aufgrund des steileren Einfallswinkels. Auch die Höhe über dem Meeresspiegel, also die Dicke der Erdatmosphäre, die die Sonne durchdringen muss, beeinflusst diesen Wert systematisch. Der Momentanwert der Globalstrahlung erreicht in Mitteleuropa an einem Sommertag bei wolkenlosem Himmel etwa $900 \text{ W}/\text{m}^2$ /VDI94/. Der Mittelwert der Globalstrahlung in den letzten 12 Monaten betrug in Stuttgart $117 \text{ W}/\text{m}^2$ (Tab. 2–2).

Tab. 2–2: Monatsmittel-, -minimal- und -maximalwerte von Juni 2010 bis Juni 2011 zur Strahlung an der Messstation Stuttgart-Zentrum (<http://cgi.stadtklima-stuttgart.de>)

Bezugszeitraum		Juni 2011			Werte der letzten 12 Monate				
Klima	Einheit	Mittelwert	Max	Min	Mittelwert	Max	Min	Max Monatsmittel	Min Monatsmittel
Globalstrahlung	W/m^2	196,8	952	0	116,6	952	0	233	24
UV-A - Strahlung		8,2	34,4	0,8	5,3	34,4	0,8	9,1	2,5
UV-B - Strahlung		0,20	1,10	-	0,08	1,10	0,00	0,20	0,00

Angaben zur Jahressumme der Globalstrahlung für die Orte Duisburg, Eifel, Korsika und Wank befinden sich in Tab. 2–3. Ebenfalls in der Tab. 2–3 eingetragen sind Messwerte der VENUS (Versuchsanlage zur Entwicklung naturnaher Umwelt-Simulationskonzepte). Diese werden in Kapitel 3.4 diskutiert.

Die optische Strahlung besteht aus Ultraviolett-Strahlung (UV) mit einer Wellenlänge von 100 bis 380 nm, sichtbarer Strahlung (VIS) mit einer Wellenlänge von 380 bis 780 nm und Infrarotstrahlung (IR) mit einer Wellenlänge von 780 bis $500 \cdot 10^{-6}$ nm. Für Polymerschädigungen ist im Wesentlichen die UV-Strahlung von Bedeutung. Nach DIN 5031, Teil 7, wird die UV-Strahlung in UV-A (315–380 nm Wellenlänge), UV-B (280–315 nm Wellenlänge) und UV-C (100–280 nm Wellenlänge) eingeteilt. UV-Strahlung ist Bestandteil der Sonnenstrahlung. Aufgrund der Absorption in der Erdatmosphäre dringen im Wesentlichen UV-A- und UV-B-Strahlung mit Wellenlängen oberhalb 300 nm bis zur Erdoberfläche vor. Dabei nimmt infolge des Ozonlochs die UV-B-Exposition der Erdoberfläche zu. Somit ist UV-Strahlung mit Wellenlängen von 300 bis 380 nm für Schäden an Oberflächenschutz-

systemen relevant. Tab. 2–2 zeigt zur Strahlung Monatsmittel-, -minimal- und -maximalwerte der letzten 12 Kalendermonate auf Basis der Messwerte der Messstation Stuttgart-Zentrum (<http://cgi.stadtklima-stuttgart.de>).

Die Globalstrahlung bestimmt auch die vorliegenden Temperaturen. Diese wiederum beeinflussen insbesondere über Temperaturänderungen das Materialverhalten. Tab. 2–3 beinhaltet die Auswertung der Temperaturverläufe in Duisburg, Eifel, Korsika und Wank über einen Messzeitraum von 10 Jahren. Dabei sind insbesondere Frost-Tauwechsel, hohe Temperaturen und Temperaturgradienten für die Materialbelastung relevant. Auf die daraus resultierenden Schädigungsmechanismen wird in Abschnitt 3.2 eingegangen. Die dargestellten Werte verdeutlichen die Unterschiede zwischen den Standorten. Während auf Wank bis zu 200 Frost-Tauwechsel im Jahr auftreten sind es in Duisburg nur knapp 60. Auf die VENUS wird im Abschnitt 3.4 eingegangen.

Tab. 2–3: Klimadaten der Orte Duisburg, Eifel, Korsika und Wank (ermittelt aus Halbstundenwerten des Zeitraums 1990 bis 2000)

	Globalstrahlung	Temperatur			Frost-Tau-Wechsel	Niederschläge		
		< 0 °C	> 25 °C	> 30 °C		h/a	Anzahl/a	mm/a
	kWh/m ² a	h/a			Anzahl/a	h/a	Anzahl/a	mm/a
Duisburg	970	481	292	59	57	672	425	708
Eifel	1011	1070	71	3	72	929	541	944
Korsika	1556	33	850	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	662
Wank	1181	2540	0	0	198	1126	386	1155
VENUS	1656	1111	1515	759	1280	130	520	12350

Der natürliche pH-Wert des Regens beträgt aufgrund des Kohlenstoffdioxids in der Luft ca. 5,6. Infolge eingetragener Luftschadstoffe (Schwefeldioxid, Stickstoffoxide), die zu Säuren umgewandelt werden, sinkt der pH-Wert und es entsteht der so genannte saure Regen. In den vergangenen 30 Jahren hat die Stärke des sauren Regens deutlich abgenommen: Der pH-Wert des Regens ist von rund 4,3 wieder auf 5,2 angestiegen /DWD/.

Bild 2–2 gibt eine Übersicht über monatliche Temperatur- und Niederschlagsmittelwerte aus den Jahren 1990 bis 1996 der Orte Aachen, Duisburg und Sylt. Während die Temperatur in Duisburg durchweg am höchsten ist, im Jahresmittel 10,9 °C, weist Sylt nur Jahresmitteltemperaturen von 8,4 °C auf. Hinsichtlich der Niederschläge sticht Aachen mit 830 mm/a heraus. Diese Daten stammen ebenso wie die Werte in Bild 2–3 vom Deutschen Wetterdienst. Um die auftretenden Maximal- und Minimalwerte der Klimadaten zu bestimmen sind ist eine Auswertung auf Tages-, besser Stundenbasis, erforderlich. Bild 2–3 zeigt exemplarisch den Verlauf relevanter täglicher Klimadaten im Jahr 2010 für Aachen.

Infolge Wärmestrahlung erfolgt eine zusätzliche Aufheizung bzw. Abkühlung der Bauwerksoberflächen (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Somit kann die Temperatur auf der Bauwerksoberfläche deutlich von der Lufttemperatur abweichen. Bild 2–4 zeigt, dass die graue Betonoberfläche bei einer Freibewitterung im Jahr 2001/2002 in Aachen auf einem Garagendach mit einer Neigung von 20 ° im Sommer Temperaturen von 55 °C aufweisen kann. Weiterhin werden die großen Temperaturdifferenzen von über 40 °C zwischen Tag und Nacht im Sommer deutlich. Bei Dachabdichtungen über Dämmschichten kann die Temperatur 75 °C bzw. an exponierten Stellen bis zu 85 °C betragen /Bra87/.

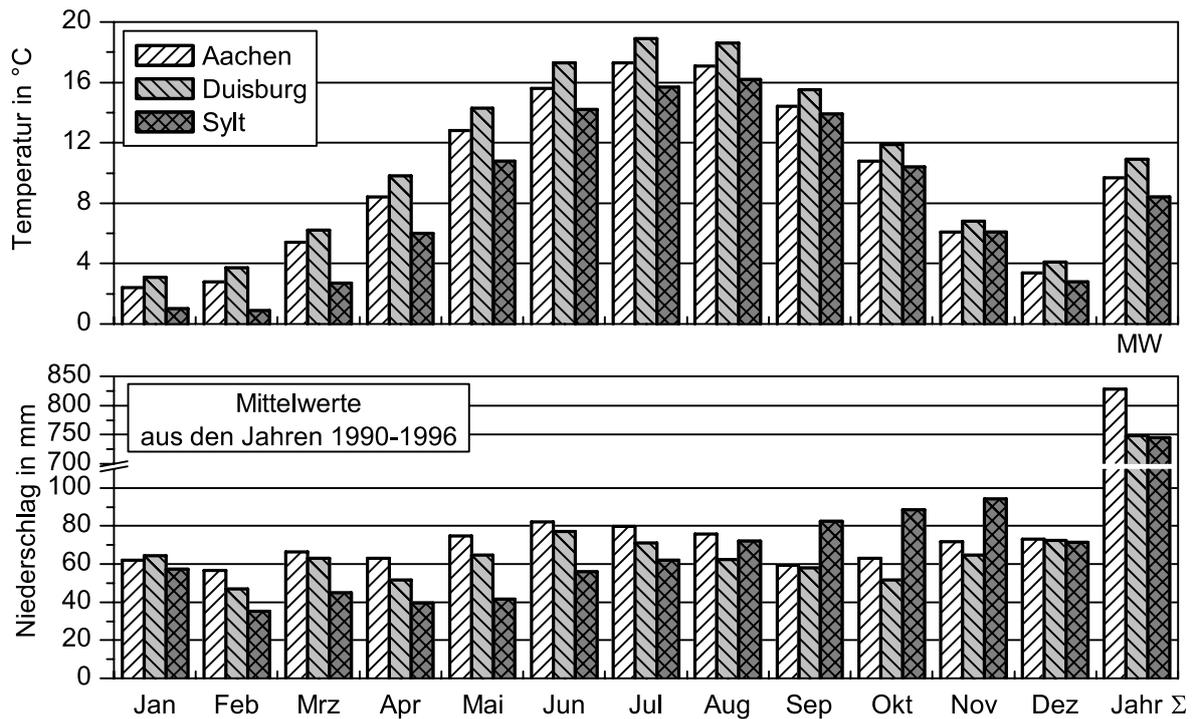


Bild 2-2: Monatliche Temperatur- und Niederschlagsmittelwerte in Aachen, Duisburg und Sylt. Daten vom Deutschen Wetterdienst

EINWIRKUNGEN AUS MECHANISCHEN BEANSPRUCHUNGEN

Mechanische Beanspruchungen auf Oberflächenschutzsysteme resultieren im Wesentlichen aus Verkehrsbelastungen. Dabei wird zwischen befahrbaren und begehbaren Flächen unterschieden. Die größten Belastungen treten durch Befahrung auf, wobei insbesondere erhöhte Scherbeanspruchungen in Brems-, Beschleunigungs- und Kurvenbereichen entstehen. Bei PKW's ist mit einer Gewichtslast je Reifen von 250 kg zu rechnen. Je nach Nutzung als Produktions-, Lager-, Park- oder Fahrfläche können höhere Lasten einwirken.

Eine weitere, jedoch im Allgemeinen nicht regelmäßige mechanische Beanspruchung, resultiert aus dem Anprall von Gegenständen. Bei Wasserbauwerken können Treibgut und Schiffe anprallen, in Abwasseranlagen können sich Gegenstände befinden und gegen die Wände prallen, während Oberflächenschutzsysteme an Fassaden durch Anprall von PKW's, Fahrrädern etc. belastet werden. Regelmäßige Stöße, Schläge, rollende oder schleifende Bewegungen von schweren Gegenständen treten im Allgemeinen nur bei Industrieböden auf.

EINWIRKUNGEN AUS CHEMIKALIEN

Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen, Behandeln und Verwenden von Chemikalien bzw. wassergefährdenden Stoffen weisen häufig Oberflächenschutzsysteme auf. Diese müssen den Einwirkungen aus den Medien standhalten. Derartige Medien sind u. a. Ottokraftstoffe, Flugkraftstoffe, Heizöle, Dieselmotoren, Rohöl, Kohlenwasserstoffe, organische Säuren, Mineralsäuren, anorganische Laugen.

Innerhalb von Abwasseranlagen und Kühltürmen kann es zur Bildung von Säuren kommen. In Abwasseranlagen entsteht unter bestimmten Randbedingungen biogene Schwefelsäure wodurch der pH-

Wert auf unter 1 sinken kann /Orl10a/. Dieses hochalkalische Milieu bedingt einen starken chemischen Angriff auf Oberflächenschutzsysteme. In Kühltürmen entsteht durch die Schadgase SO_2 und NO_x im Abgaskondensat eine saure Atmosphäre mit pH-Werten unter 5. Diese kann auch in Kombination mit UV-Strahlung Oberflächenschutzsysteme chemisch angreifen /Eng11/.

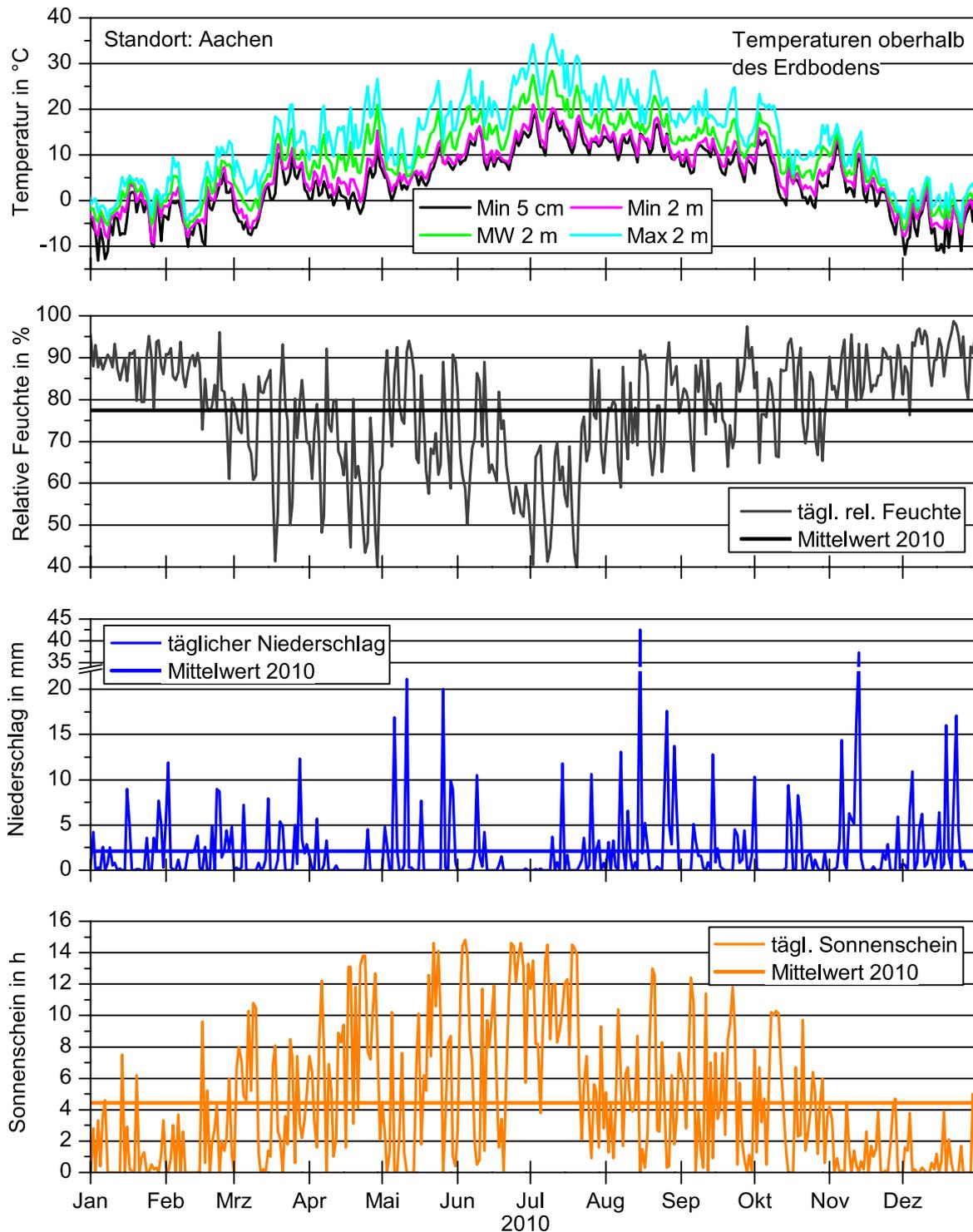


Bild 2-3: Klimawerte für Aachen im Jahr 2010. Daten vom Deutschen Wetterdienst

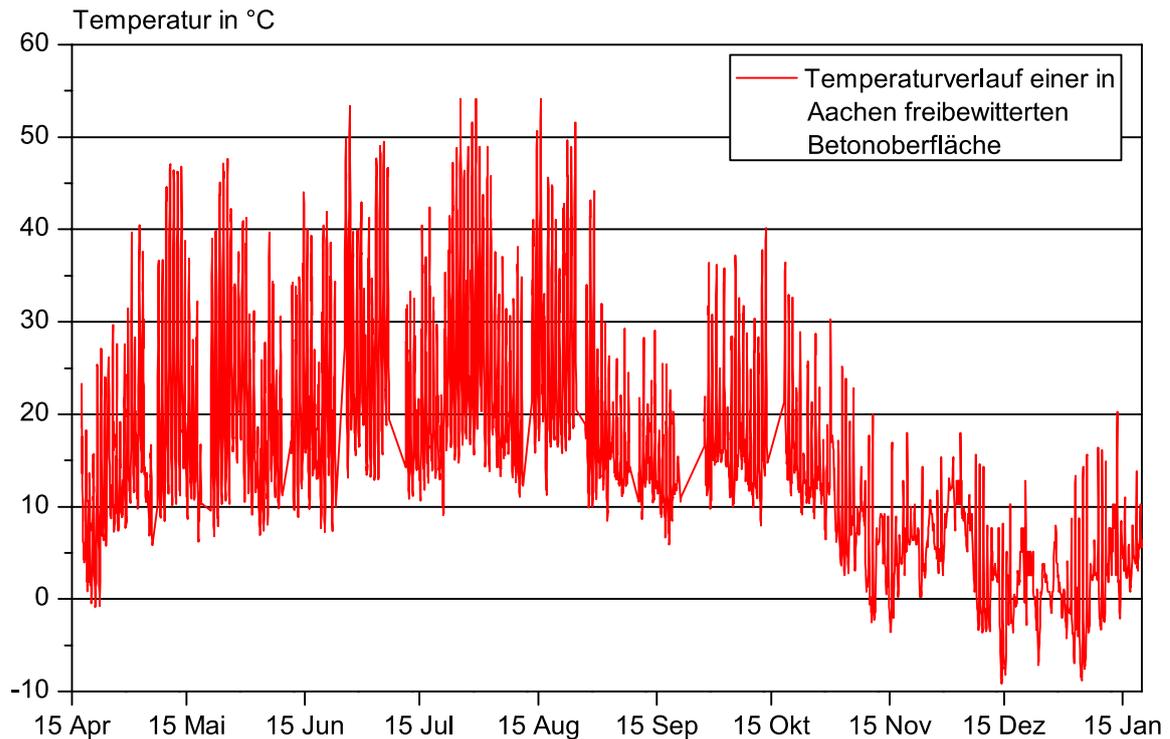


Bild 2-4: Temperaturverlauf einer freibewitterten Betonoberfläche (Neigung 20 °, auf einem Garagendach), Werte auf Stundenbasis /Rau02/

2.2.3 EINWIRKUNGEN AUS DEM BETONUNTERGRUND

Bild 2-1 verdeutlicht die Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme von der innen liegenden Seite, also dem Betonuntergrund. Die Einwirkungen resultieren aus der Alkalität und Feuchte des Betons sowie Rissbewegungen und Volumenänderungen. Im Folgenden werden die genannten Punkte erläutert.

EINWIRKUNGEN AUS ALKALITÄT

Bei der Zementhydratation spaltet sich freies Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ab. Dieses geht mit anderen Alkalien teilweise in Lösung, wodurch sich in der Porenlösung des Betons ein pH-Wert von rd. 12,5 bis 13,5 einstellt /Schi96/. Zumindest die unmittelbar im Kontakt zum Beton stehenden Schichten/Hydrophobierungen des Oberflächenschutzsystems müssen somit gegenüber alkalischen Lösungen stabil sein. Falls diese Schichten nicht dicht sind, wirkt die Lauge auch auf die darauf folgenden Schichten ein.

EINWIRKUNGEN AUS DER BETONFEUCHTE

Die Ausbildung des Porenraums im Beton hängt wesentlich vom Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) ab. Das für eine vollständige Hydratation des Zementes notwendige Wasser von etwa 38 % der Zementmasse ist im Zementstein größtenteils chemisch gebunden, aber ein Teil des Wassers wird auch in Gelporen physikalisch gebunden. Somit enthält ein vollständig hydratisierter Zementstein rund 27 Vol.-% Gelporen und Poren, die durch Schrumpfen entstanden sind. Erst oberhalb eines w/z-Wertes von 0,38 bilden sich Kapillarporen aus dem verdunsteten Überschusswasser. Ein üblicher w/z-

Wert von 0,6 bewirkt z. B. im Falle unporöser Zuschläge und vollständiger Verdichtung einen Porenraum im Zementstein von rd. 44 Vol.-%, wovon rd. 24 Vol.-% Kapillarporen sind /Wes93/. Innerhalb der Kapillarporen erfolgt der Wassertransport sowie die Wasseraufnahme und -abgabe.

Die Betonfeuchte beeinflusst

- die Materialeigenschaften der direkt auf den Beton applizierten Oberflächenschutzschicht, indem Komponenten des Materials kapillar in den relativ trockenen Beton eindringen (Entmischung) bzw. eine Verdünnung des Materials durch Wasserfilme an der Betonoberfläche erfolgt.
- die Adhäsion zwischen der unmittelbar auf den Beton applizierten Oberflächenschutzschicht und dem Beton (siehe auch Abschnitte 2.3 und 3.3).
- die Entstehung von Blasen in Oberflächenschutzsystemen. Hierauf wird in Abschnitt 3.2.5 eingegangen.

EINWIRKUNGEN AUS RISSENTSTEHUNG UND RISSBEWEGUNGEN

Betonrisse können aus unterschiedlichen, sich teilweise überlagernden Ursachen entstehen. Äußere Belastungen können Trenn-, Biege-, Sammel-, Verbund- oder Schubrisse bewirken. Hinzu kommen Oberflächen- oder Trennrisse infolge Zwangsbeanspruchungen, z. B. resultierend aus Temperaturänderungen.

Die rechnerische Rissbreite w_k ist als mittlere Breite im Wirkungsbereich der rissverteilenden Bewehrung zu verstehen. Zum Bauteilrand hin kann bei dünnen, auf Biegung beanspruchten Bauteilen die Rissbreite stark zunehmen. Bei der Beurteilung der Rissbreite ist von der Breite an der Bauteiloberfläche auszugehen, obwohl diese von der rechnerischen Rissbreite w_k stark abweichen kann. Die Begrenzung der rechnerischen Rissbreite hinsichtlich der Aspekte Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit erfolgt anhand der in DIN 1045 gegebenen Bemessungsregeln. Für Bauteile mit besonderen Anforderungen (z. B. Schwimmbecken, Keller im Grundwasser, Parkbauten) können strengere Begrenzungen der Rissbreite erforderlich sein (siehe auch /Rau08a/, /DBV10/). Um die Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme aus der Rissentstehung zu verringern, sollten diese erst nach weitestgehend abgeschlossener Rissbildung, z. B. nach jahreszeitlichen Temperaturwechseln, ersten Belastungen, aufgebracht werden.

Rissbreiten können sich infolge von dynamischen Beanspruchungen, Lastumlagerungen und Temperaturwechseln im Laufe der Zeit ändern. Die Änderung kann wiederkehrend sein. Wiederkehrende Änderungen können

- kurzzeitig (z. B. infolge von Verkehrslasten),
- täglich (z. B. infolge von Sonneneinstrahlung) oder
- langfristig (z. B. infolge von Jahreszeitenwechseln)

auftreten.

An Stahlbetonbauwerken wurden Rissbreitenänderungen infolge Temperaturänderungen von 4,5 bis 9,0 $\mu\text{m}/\text{K}$ gemessen /Gie89/. Tab. 2–4 fasst Ergebnisse von Rissbreitenmessungen an Stahlbetonbauteilen aus der Literatur zusammen.

Tab. 2-4: Maximale Rissbreitenänderungen an Stahlbetonbauteilen im Jahresverlauf

Bauteil	Rissart	Δw in μm	Quelle
Balkonkragplatte	Trennriss	450	/Gie89/
Brandschutzwand		125	
Außenwand		250	
Außenwand	Schwindriss	12	/Gie06/
Stahlbetonbau	-	100...500	/Rie79/

Kenntnisse über Rissbewegungen an der Stahlbetonoberfläche sind insbesondere für vollflächige Instandsetzungsmaßnahmen, also dem Aufbringen von Oberflächenschutzsystemen, sowie bei der Rissverpressung von Bedeutung. Rissüberbrückende Oberflächenschutzsysteme werden nach der RL-SIB in drei Rissüberbrückungsklassen eingeteilt. Es gibt Systeme für

- vorhandene und nachträglich entstehende Risse, Rissbreite von max. 0,1 mm,
- vorhandene und nachträglich entstehende oberflächennahe Risse, Rissbreite von max. 0,15 mm, zulässige Bewegung unter Temperaturbeanspruchung bis 0,05 mm,
- vorhandene und nachträglich entstehende oberflächennahe Risse und/oder Trennrisse, Rissbreite von max. 0,3 mm, Bewegung unter Temperatur- und Lastbeanspruchung bis 0,2 mm.

Ein Vergleich der Rissüberbrückungsklassen mit den in Tab. 2-4 dargestellten, gemessenen Rissbreitenänderungen verdeutlicht die Differenz zwischen der Leistungsfähigkeit von Oberflächenschutzsystemen und den ggf. auftretenden Rissen.

EINWIRKUNGEN AUS VOLUMENÄNDERUNGEN

Volumenänderungen des Betons können einerseits das komplette Bauteil bzw. größere Bauteilbereiche und andererseits lokale Bereiche betreffen. Wärme- und Feuchtedehnung im Beton tritt großflächig auf, während Treiberscheinungen infolge Stahlkorrosion, Alkali-Silika-Reaktionen sowie Reaktionen aus sulfidhaltigen Gesteinskörnern lokal begrenzt sind. Bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit kommen zu diesen Dehnungen zusätzlich Risse hinzu. Hieraus resultieren Kräfte in der Verbundzone zum Oberflächenschutzsystem und im Oberflächenschutzsystem.

Die Längenänderung Δl infolge Temperaturänderung ΔT kann anhand von

$$\Delta l = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l$$

Gleichung 2-1

mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von Beton $\alpha_T \sim 10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

abgeschätzt werden. Die Feuchtedehnung hängt maßgeblich von der Betonzusammensetzung und den Möglichkeiten der Austrocknung ab. Das Ausmaß der Treiberscheinungen hängt von den Reaktionsmechanismen der Gesteinskörnung bzw. der Bewehrung bei den jeweils vorliegenden Randbedingungen ab (weiterführende Literatur /Mie10/, /DFG537/).

2.3 ADHÄSION VON OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEMEN AUF BETON

2

2.3.1 ALLGEMEINES

Unzureichende Adhäsion von Oberflächenschutzsystemen auf Beton ist eine der Hauptursachen für Schäden bei Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen. Schadensbilder wie Ablösungen, Blasenbildungen oder ähnliches hängen häufig mit einem Verlust bzw. einer Verminderung der Adhäsion zwischen Beton und Instandsetzungsprodukt zusammen. Bild 3–2 zeigt zwei Schadensfälle, die auf eine mangelnde Adhäsion zurückzuführen sind.

Unter Adhäsion wird allgemein die Summe aller Wechselwirkungen verstanden, die zur Haftung zwischen zwei Körpern führen. In diesem Zusammenhang werden oftmals die Begriffe „Adhärens“ (Substrat) und „Adhäsiv“ (Klebe- bzw. Beschichtungstoff) verwendet.

Im Rahmen dieses Abschnittes werden die vier verschiedenen Adhäsionsmechanismen kurz vorgestellt. Aus den Adhäsionsmechanismen ergeben sich auch die Einflüsse auf die Adhäsion. Diese werden in Bild 2–5 genannt.

2.3.2 ADHÄSIONSMECHANISMEN

Die Ursache adhäsiver Kräfte zwischen artfremden Stoffphasen kann auf mechanische Verzahnungseffekte, physikalische Wirkungen und chemische Reaktionen zurückgeführt werden. Für die Ausbildung adhäsiver Kräfte sind geometrische und physikalisch-chemische Oberflächeneigenschaften des Substrats und die physikalisch-chemischen Eigenschaften des flüssigen Adhäsivs von Bedeutung /Fie87/. Bild 2–5 zeigt die wesentlichen Einflüsse auf die technische Adhäsion. Nachfolgend werden die Adhäsionsmechanismen weitergehend erläutert.

Die mechanische Adhäsion (mechanische Verzahnung) geht davon aus, dass das flüssige Adhäsiv in den Poren und Vertiefungen der Oberfläche des Betonsubstrats aushärtet und dort wie Dübel oder Druckknöpfe verankert ist, „Druckknopftheorie“. Mit zunehmender Rauheit des Betons, hervorgerufen durch eine mechanische Vorbereitung, wie z. B. Sandstrahlen, steigt i. d. R. die Verbundfestigkeit. Bild 2–6 zeigt den Einfluss einer Vorbereitung des Untergrundes auf die Güte der Adhäsion am Beispiel Beton mit polymeren Beschichtungen. Deutlich werden dabei auch die erheblichen Unterschiede zwischen den Beschichtungssystemen.

Die Rautiefe ist ein Maß für die Rauheit einer Oberfläche in mm, im Regelfall bestimmt nach dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann /Kau71/ (DIN EN 1766). Die Rautiefe R_q ist definiert als Höhe des gedachten, zylindrischen Körpers mit dem Kreisdurchmesser d und dem Sandvolumen V , der alle Spitzen des Untergrundes einschließt. Jedoch stellt die Rauheit bei Weitem nicht die alleinige Einflussgröße auf die Adhäsion dar. Bei gleicher Untergrundrauheit und gleichem Adhäsiv bedingen unterschiedliche Untergründe erhebliche Differenzen in der Haftzugfestigkeit. Dies wird einerseits durch die spezifische Adhäsion begründet, andererseits ist wahrscheinlich der Einfluss gesteinsoberflächenspezifischer Topographien unterhalb der messbaren Rauheit vorhanden. Diese submikroskopischen Rauheiten können Verzahnungseffekte in einer Größenordnung von wenigen nm (Größe von Makromolekülen) hervorrufen /Sas94/.

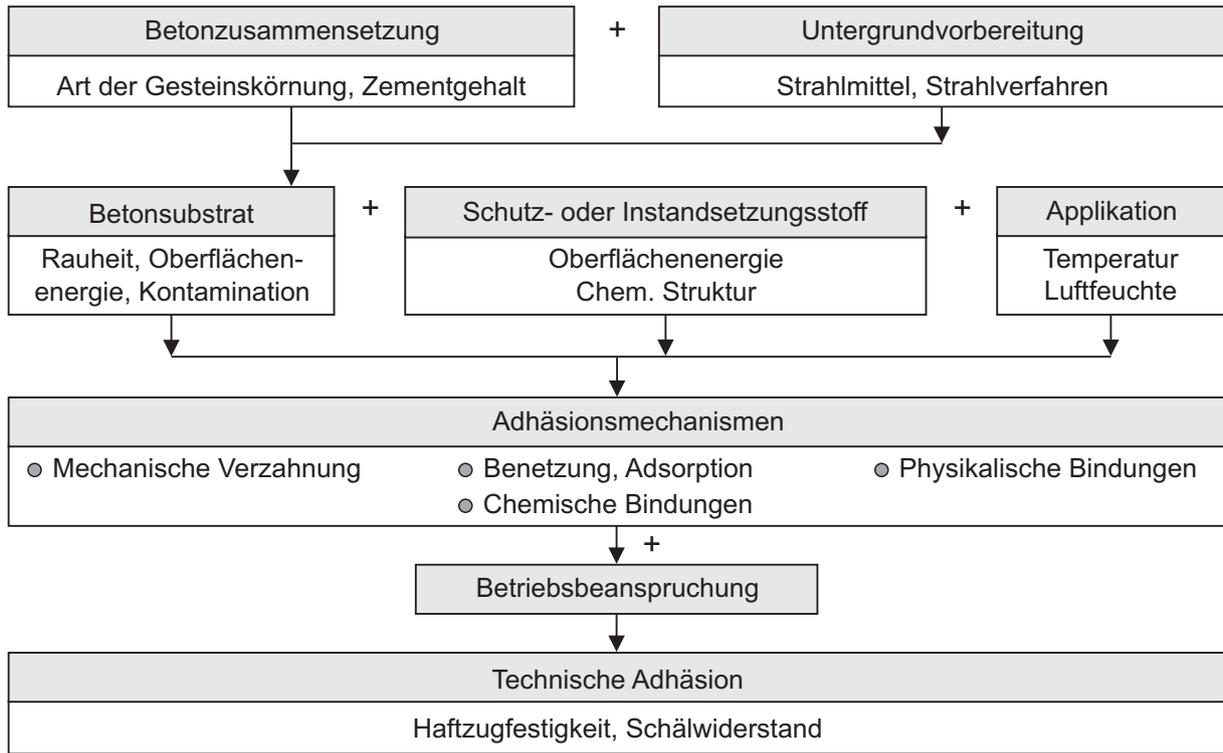


Bild 2-5: Interaktionsschema zu den Einflüssen auf die Adhäsion nach /Sas94/

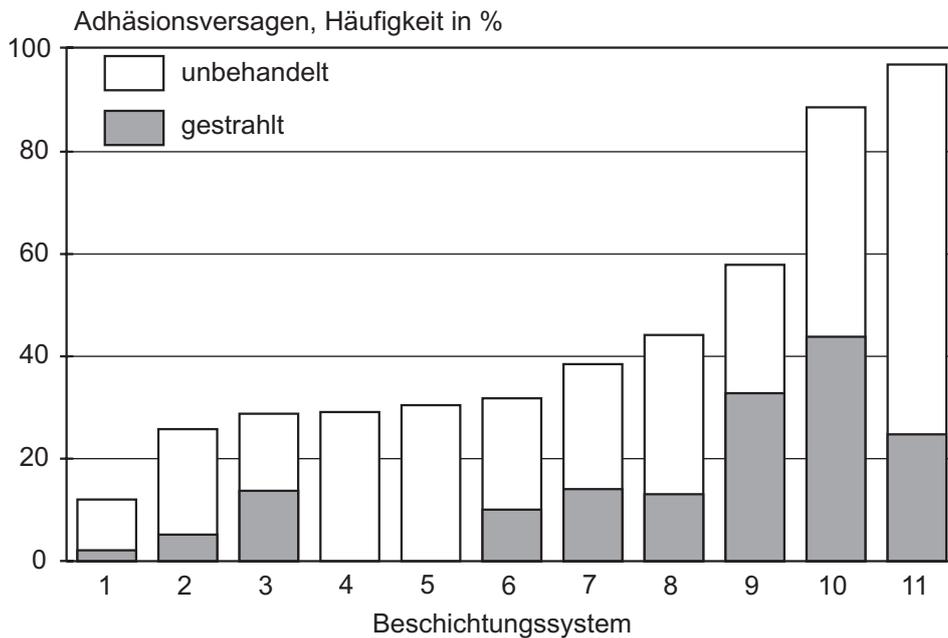


Bild 2-6: Einfluss der Vorbereitung des Betons auf die Adhäsion nach /Sas94/

Die Voraussetzung für die adsorptive Anlagerung eines Stoffes auf einer Oberfläche besteht darin, dass der Stoff die Oberfläche benetzt (Benetzung, Adsorption). Durch Randwinkelmessungen kann dies Benetzungsverhalten quantifiziert werden. Die Ausbildung des Randwinkels im Dreiphasensystem gasförmig-flüssig-fest bei der Benetzung einer festen Oberfläche durch eine Flüssigkeit zeigt Bild 2-7.

Bereits im Jahr 1805 hat Young /You05/, /Mic69/ im Rahmen von Benetzungsversuchen von Festkörperoberflächen einen funktionalen Zusammenhang zwischen Oberflächen- bzw. Grenzflächenener-

gien und dem sich einstellenden Benetzungswinkel hergeleitet (Gleichung 2-2). Dies erfolgte unter den Voraussetzungen

- einer ideal ebenen Festkörperoberfläche,
- der Reversibilität der Benetzung und
- der Vernachlässigung der Schwerkraft

unter Heranziehung der Definition, dass die Oberflächenenergie γ eine gegen die Kohäsion gerichtete Energie zur Erzeugung einer freien Oberfläche ist.

$$\cos \vartheta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}$$

Gleichung 2-2

γ_{SV}	Oberflächenenergie des Festkörpers
γ_{SL}	Grenzflächenenergie zwischen Festkörper und Flüssigkeit
γ_{LV}	Oberflächenenergie der Flüssigkeit
ϑ	Randwinkel

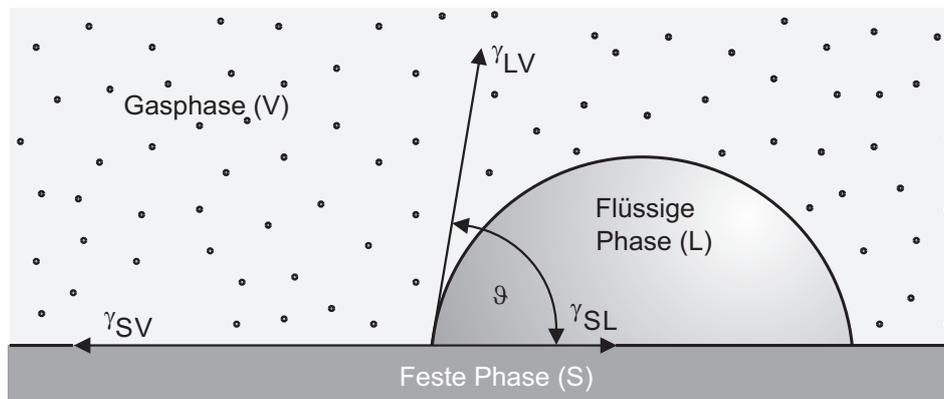


Bild 2-7: Ausbildung des Dreiphasensystems gasförmig-flüssig-fest bei der Benetzung einer festen Oberfläche durch eine Flüssigkeit (S = Solid, L = Liquid, V = Vapour)

Im Gegensatz zu polymeren Beschichtungsstoffen und vielen anderen organischen Verbindungen liegen im Falle mineralischer Betonoberflächen energiereiche Flächen vor, die jedoch unter atmosphärischen Bedingungen stets mit einer bis zu mehrere Moleküllagen dicken Adsorbatschicht aus Gasen oder Dämpfen belegt sind. Durch derartige Anlagerungen werden i. d. R. die wirksamen Oberflächenenergien und damit die Benetzungseigenschaften in Richtung energiearme Oberflächen verändert. Weiterhin wird der Randwinkel durch die Rauheit des Betons, der Benetzung unterschiedlicher Stoffphasen des Betons (Zementstein, Gesteinskörnung), dem Eindringen der Flüssigkeit in den Beton und der Polarität des Betons beeinflusst.

Als Ursache der Physisorption (physikalische Bindungen) werden intermolekulare Bindungen, die von den Waalschen Kräften und Wasserstoff-Brückenbindungen, angesehen. Diese Kräfte bewirken eine molekulare Nahordnung infolge gegenseitig orientierter elektrischer Felder, wobei ein energetisch begünstigter Zustand entsteht. Man unterscheidet die von den Waalschen Kräften nochmals in Orientierungskräfte (Dipol-Dipol), Induktionskräfte (Dipol-Induzierter Dipol) und Dispersionskräfte (Induzierter Dipol-Induzierter Dipol) /Ben03/.

Die Bindungsenergie der Wasserstoff-Brückenbindungen ist mit ≤ 50 kJ/mol höher als die der von den Waalschen Kräften. Generell erreichen die Bindungsenergien intermolekularer Bindungen (Nebenva-

lenzen) geringere Werte als die chemischen, interatomaren oder Hauptvalenzbindungen.

Aufbauend auf diesen elektrischen Wechselwirkungen der Moleküle wurden im Wesentlichen folgende Hinweise auf funktionelle Abhängigkeiten zwischen dem dielektrischen Verhalten der Adhäsionspartner und ihrem Haftvermögen erarbeitet /Schw95/, /Bis83/, /Mic69/:

- Die Polarisierungstheorie nach de Bruyne aus dem Jahre 1935 wird in Adhäsionsregeln zusammengefasst, die zum einen eine feste Verbindung zwischen Adhärens und Adhäsiv ausschließen, wenn einer der Partner polar und der andere unpolar ist, und zum anderen als notwendige Voraussetzung für adhäsive Bindungen einen maximalen Molekülabstand von 50 nm nennen.
- Die elektrostatische Theorie nach Derjagin aus dem Jahre 1950 basiert auf der Grundlage der Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht in der Kontaktfläche infolge von Diffusion der Ladungsträger.
- Die Diffusionstheorie nach Vojucki aus dem Jahre 1960 geht davon aus, dass im Falle der Adhäsion zweier Polymerphasen (z. B. zwei Schichten eines Oberflächenschutzsystems) im molekularen Bereich eine mechanische Verzahnung durch Diffusion von ganzen Molekülketten bzw. Kettensegmenten entstehen kann.

Chemische Bindungen werden durch interatomare Kräfte (Hauptvalenzkräfte) mit Bindungsenergien von 60 bis 1000 kJ/mol gebildet. Grundsätzlich besteht das Wesen der chemischen Hauptvalenzbindung in der Wechselwirkung der Elektronen der äußersten Schale (Valenzelektronen), mit der Folge einer energiebegünstigten gegenseitigen Fixierung der Atomkerne. Zu unterscheiden sind drei Arten von Hauptvalenzbindungen: Die Ionenbindung, die kovalente Bindung und die metallische Bindung. Die metallische Bindung hat jedoch bei Oberflächenschutzsystemen auf Beton keine Relevanz.

2.4 MATERIALIEN FÜR DEN OBERFLÄCHENSCHUTZ

2.4.1 ALLGEMEINES

Die Materialien aus denen Oberflächenschutzsysteme bestehen sind im Wesentlichen:

- Epoxidharze
- Polyurethane
- Acrylate
- Siliciumorganische Verbindungen
- Dispersionen
- Glas
- Zemente/Gesteinskörnungen
- sowie Zusatzstoffe, Zusatzmittel, Pigmente, Füllstoffe, Additive und Lösemittel.

Auf eine bis in die Polymer- und Zementchemie reichende Beschreibung der Materialien wird hier verzichtet, dies kann u. a. /Dom05/, /Wes93/, /Sta01/ entnommen werden. Stattdessen werden in den nachfolgenden Abschnitten die bauspezifischen Materialien mit ihren Eigenschaften erläutert.

2.4.2 POLYMERE

WESENTLICHE BEGRIFFE DER POLYMERCHEMIE

Polymere sind hochmolekulare Werkstoffe (Kunststoffe), die heute fast ausschließlich synthetisch hergestellt werden. Unter dem Sammelbegriff Polymer werden

- Thermoplaste
- Duroplaste (Duromere) und
- Elastomere

zusammengefasst.

Die Ausgangsstoffe der Polymere werden als Monomere bezeichnet. Monomere weisen entweder Mehrfachbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen (ungesättigte Bindungen) oder reaktionsfähige Endgruppen (funktionelle Gruppen) auf. Der Aufbau der Polymere wird wesentlich durch die chemischen Hauptelemente

- Kohlenstoff C und
- Wasserstoff H

bestimmt. Daneben sind für die Struktur und Eigenschaften der unterschiedlichen Polymere weitere Elemente wie Sauerstoff, Stickstoff, Chlor, Fluor und Schwefel von Bedeutung.

Neben dem chemischen Aufbau sind die Bildungsreaktionen und die Struktur der Polymere wesentliche Einteilungskriterien. Bei den Bildungsreaktionen wird zwischen Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition unterschieden, während die Struktur durch vernetzte sowie nicht vernetzte amorphe oder teilkristalline Polymere bestimmt wird. Thermoplaste sind nicht vernetzte Polymere, ihre Eigenschaften werden durch Nebenvalenzbindungen und „mechanische Verschlingungen“ bestimmt. Elastomere weisen i.d.R. schwach vernetzte Kettenmoleküle auf. Ihre Eigenschaften werden sowohl durch Hauptvalenz- als auch Nebenvalenzbindungen beeinflusst, während die Eigenschaften der Duroplaste fast ausschließlich durch Hauptvalenzbindungen gesteuert werden. Duroplaste weisen somit vernetzte Kettenmoleküle auf.

Copolymere haben in ihren Kettenmolekülen verschiedene Monomere. Durch die Verwendung von zwei oder mehr Monomeren können besondere Eigenschaften erzeugt werden. Kombiniert man z. B. in einem Copolymer Segmente aus weichen, beweglichen Ketten mit Segmenten aus steifen Ketten mit hoher Kristallisationsneigung, gelangt man zu thermoplastischen Elastomeren, bei denen durch die Zusammenlagerung verschiedener Polymerketten bei Raumtemperatur in den kristallinen Bereichen eine Art physikalische Vernetzung entsteht. Die weichen Segmente bleiben beweglich, so dass elastische Eigenschaften resultieren. Bei höheren Temperaturen schmelzen die Kristallite auf und die Masse wird thermoplastisch.

In einem Polymer-Blend sind verschiedene Polymere miteinander vermischt. Die Eigenschaften der Polymer-Blends hängen wesentlich von der Art und Güte der Vermischung ab. Sind beide Polymere miteinander verträglich, so können durch das Mischen der beiden Komponenten im Schmelzezustand homogene Gemische hergestellt werden. Mischungen aus teilweise bzw. begrenzt verträglichen Polymeren nennt man Einphasengemische. Der häufigste Fall sind jedoch die Mehrphasengemische. Dies sind so genannte heterogene Gemische aus nicht verträglichen Polymeren. Anhand von Blends erfolgt die Anpassung von Thermoplasten aber auch Duroplasten wie Epoxid- und Phenolharzen an ihre Aufgaben, indem z. B. die Zähigkeitseigenschaften verbessert werden /Men02/. Durch Vermischung von Epoxidharz und Polyurethan können z. B. so genannte elastifizierte Epoxidharze herge-

stellt werden, die begrenzte rissüberbrückende Eigenschaften aufweisen.

Polymere, die durch Vermischen mehrerer flüssiger Komponenten entstehen, haben eine Verarbeitungszeit, auch Topfzeit genannt. Diese ist die maximale Zeitspanne, innerhalb der das Material nach dem Mischen verarbeitet sein soll.

Bei den in Oberflächenschutzsystemen eingesetzten Materialien sind die Polymere im Allgemeinen das Bindemittel für Füllstoffe, Pigmente und Additive. Zusätzlich wird Wasser bzw. Lösemittel zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit, im Wesentlichen zur Senkung der Viskosität, verwendet. Vor der Beschreibung der relevanten Polymere (Bindemittel) werden zunächst die anderen Materialbestandteile, nachfolgend Zusatzstoffe genannt, erläutert.

ZUSATZSTOFFE

Synthetisierte Polymere sind begrenzt verarbeit- und verwendbar. Wärme- und Sauerstoffeinwirkung würden sie häufig bereits bei der Verarbeitung schädigen. Dazu kommen die Umweltbedingungen während des Einsatzes der Polymere. Außer dem Schutz gegen diese schädigenden Einwirkungen erfordert die jeweilige Anwendung eine mehr oder weniger große Anzahl an Zusatzstoffen, die das Eigenschaftsbild, die Verarbeitbarkeit oder das Aussehen beeinflussen. Daraus resultiert eine Vielzahl unentbehrlicher Zusatzstoffe, die aus den Ausgangsprodukten praxistauglich verarbeitbare Harze, Formmassen und Werkstoffe machen.

Grundsätzlich können drei Arten von Zusatzstoffen unterschieden werden:

1. Funktions-Zusatzstoffe, wie

- Stabilisatoren gegen thermische Schädigungen bei der Verarbeitung und als Alterungs- sowie UV-Schutz im Gebrauch
- Weichmacher und Flexibilisatoren zur Erhöhung der Schlagzähigkeit
- Flammenschutzmittel zur Reduktion der Entflammbarkeit
- Dispergiermittel zur Erniedrigung der Viskosität und Verhinderung der Reagglomeration
- Leitfähige Zusatzstoffe, z. B. Ruße zur Verminderung der Widerstandswerte
- Antistatika gegen elektrische Aufladung
- Treibmittel zur Schaumstoffherstellung
- Entschäumer / Entlüfter zur Vermeidung von Luftporen

2. Füllstoffe und Pigmente (Performance Additive) sowie

3. Verstärkungsstoffe (Fasern oder Faserprodukte zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften)

Diese Zusatzstoffe für Polymere sind in /Dom05/ ausführlich beschrieben. Im Folgenden wird die Funktion einiger Zusatzstoffe kurz erläutert.

Stabilisatoren unterschiedlichen chemischen Aufbaus sind notwendig, um z. B. Schädigungen sowohl bei der Verarbeitung durch Wärme, als auch im Gebrauch durch Wärme-, Licht- oder UV-Einfluss zu vermeiden oder mindestens zu reduzieren. Die vielfältigen Stabilisatorensysteme müssen in ihrer Zusammensetzung und ihren Anteilen auf das Polymer abgestimmt sein. Ruß ist ein hervorragender UV-Stabilisator, lässt sich jedoch nur für schwarze Einfärbungen einsetzen. Für hellfarbige Polymere gibt es unterschiedliche Stabilisatorensysteme, u. a. sterisch gehinderte Amine.

Weichmacher dienen dazu, die Härte und die Sprödigkeit von Polymeren herabzusetzen. Sie vergrößern den Abstand der Molekülketten und verringern so die Nebenvalenzkräfte. Dieses Ziel kann

mit innerer und äußerer Weichmachung erreicht werden. Innere Weichmachung geschieht durch das Copolymerisieren von zwei verträglichen Monomeren, deren Glasübergangstemperaturen weit auseinander liegen. Bei der äußeren Weichmachung handelt es sich um einen Solvations-, d. h. Quellvorgang, bei dem der niedermolekulare Weichmacher von den Polymeren durch Nebenvalenzkräfte gebunden wird. Da derartige Weichmacher nicht über Hauptvalenzkräfte in die Polymerstruktur eingebunden sind, neigen sie zum Verdampfen oder Auswandern, womit sich die Flexibilität irreversibel vermindert. Der Anteil an Weichmachern kann je nach gewünschter Flexibilität bis zu 50 % betragen. Bild 2–8 zeigt anhand des Schubmoduls den Einfluss eines Weichmachers auf PVC.

Flammschutzmittel setzen die Entflamm- und Brennbarkeit von Polymeren herab indem sie physikalisch kühlen, beschichten oder verdünnen. Leitfähige Zusatzstoffe, wie z. B. Grafit, Kohlenstoff-Fasern (C) und metallische Pulver erniedrigen den spezifischen Widerstand der Polymere. Dies kann bei speziellen Industrieböden zum Einsatz kommen.

Zur Erniedrigung der Viskosität wird Harzen auf Kohlenstoffbasis, z. B. Epoxidharzen, häufig Lösemittel zugegeben. Aus ökologischen Gründen wird jedoch eine Reduktion bzw. Vermeidung von Lösemitteln angestrebt, womit der Anteil lösemittelfreier Systeme, Full-Solid-Systeme oder wasserverdünnbare Systeme, zunimmt. Diese Systeme erfordern neue Additive wie Entschäumer, Entlüfter und Dispergierhilfen.

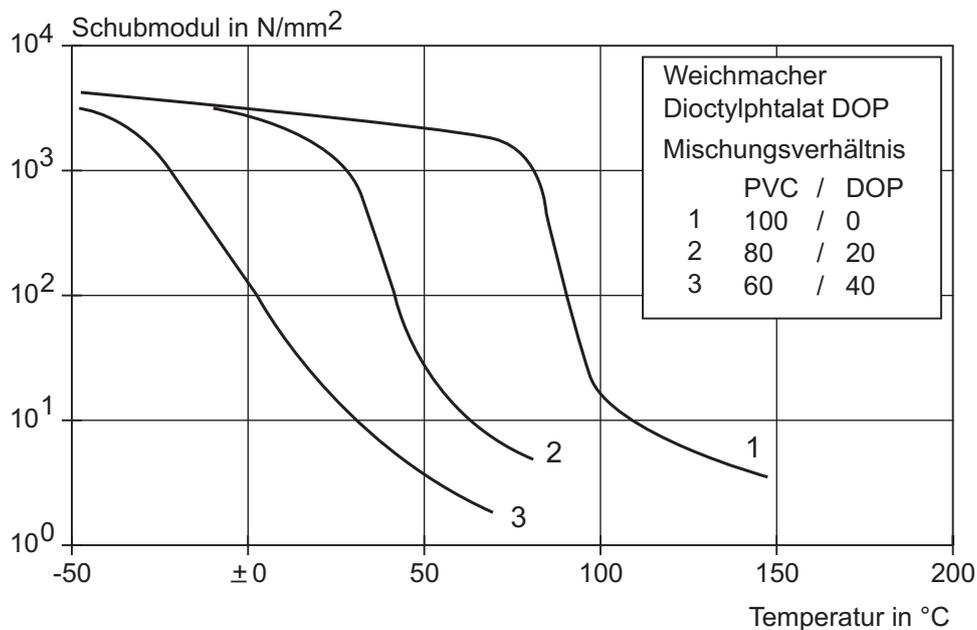


Bild 2–8: Einfluss des Weichmachers Diethylphthalat auf den Schubmodul von PVC

Füllstoffe sind kleine Partikel, kurze Fasern oder Kugeln aus organischen (Zellulose, Holzmehl, Sisal- und Kokosfasern) oder anorganischen (Gesteins- und Mineralmehle, Kreide, Talkum, Glaskugeln) Stoffen. Für Beschichtungsmaterialien werden hauptsächlich mineralische Mehle mit Korngrößen zwischen etwa 1 und 30 μm verwendet. Die maximale Teilchengröße sollte geringer als ein Drittel der geplanten Schichtdicke sein. Neben der Einsparung an Polymer ermöglichen Füllstoffe im Wesentlichen größere Schichtdicken pro Applikation; sie erhöhen die mechanische Widerstandsfähigkeit, verbessern die Zwischenschichthaftung und reduzieren die Sprödigkeit, das Schwinden sowie thermische Längenänderungen.

Hinsichtlich der Farbstoffe für Polymere wird zwischen unlöslichen, sogenannten Pigmenten, und löslichen Farbstoffen unterschieden. Pigmente ergeben bei normaler Teilchengröße (etwa 0,1 bis

1 µm) eine gedeckte Durchfärbung des Polymers, während lösliche Farbstoffe bei glasklaren Polymeren (PMMA, PS, PC) die Herstellung farbig transparenter Werkstoffe ermöglichen. Der Anteil der Farbstoffe im Polymer variiert zwischen 0,5 % bis 2 %, womit keine wesentlichen Änderungen mechanischer oder sonstiger Eigenschaften verbunden sind /Hel01/. Pigmente dienen neben der Farbgebung auch zur Verringerung der Absorption des Polymers von UV-Strahlung.

Verstärkungsstoffe sind längere Fasern oder Faserprodukte in Form von Geweben, Matten, Vliesen oder Rovings. Sie dienen im Wesentlichen der Erhöhung von Festigkeit, Steifigkeit und Wärmestandfestigkeit.

EPOXIDHARZE

Epoxidharze, Polyurethane und Acrylate sind die für Oberflächenschutzsysteme relevanten Harze auf Kohlenstoffbasis. Epoxidharze sind Duroplaste, die durch Polyaddition hergestellt werden. Da bei der Polyaddition keine abzuführenden Nebenprodukte entstehen, können Epoxidharze auf der Baustelle mittels Epoxidharz- und Epoxidhärterkomponenten hergestellt werden. Die genaue Dosierung sowie ausreichende Vermischung der Komponenten Harz und Härter sind von essentieller Wichtigkeit, da jede Mehr- oder Mindermenge bzw. unzureichende Vermischung zu unvollständigen Reaktionen mit nachteiligen Auswirkungen auf die Eigenschaft führt.

Die Harzkomponente besteht meist aus Umsetzungsprodukten von multifunktionellen Hydroxylverbindungen, z. B. Bisphenol A mit Epichlorhydrin. Der Polymerisationsgrad wird durch das eingesetzte Molverhältnis der Reaktionspartner Epichlorhydrin und Bisphenol gesteuert. Bisphenol-F-Harze weisen im Vergleich zu den unmodifizierten flüssigen Bisphenol-A-Harzen vor allem eine niedrigere Viskosität und eine geringere Neigung zur Kristallisation auf. Im Bauwesen werden jedoch überwiegend Bisphenol-A-Harze oder Kombinationen aus Bisphenol-A- und Bisphenol-F-Harzen verwendet. Zur Charakterisierung der Epoxidharze dienen u. a. Kennwerte wie Viskosität, Dichte und Epoxidäquivalent. Das Epoxidäquivalent entspricht derjenigen Harzmenge in Gramm, die ein Mol epoxidisch gebundenen Sauerstoff enthält.

Die Vernetzung zum Duroplast erfolgt über Epoxidgruppen, z. B. Polycarbonsäureanhydriden oder Aminen. Im Bauwesen werden vor allem Amine eingesetzt, da diese eine Kalt härtung ermöglichen. Dabei wird zwischen

- Polyaminen: aliphatische, cycloaliphatische und aromatische Amine wie Diethylentriamin (DETA), Triethyltetraamin (TETA), Isophorondiamin (IPDA) und Phenylendiamin,
- Polyaminadukten: Reaktionsprodukte aus Polyaminen und Epoxidharzen,
- Polyaminoamiden: Fettsäurederivate der Polyamine

unterschieden. Neben den Addukthärtern erfolgt häufig der Einsatz von Blends, die im Wesentlichen eine Mischung aus aminbasiertem Härter, Reaktivverdünner, Lösemittel sowie Hilfsstoffen darstellen.

Epoxidharze für Oberflächenschutzsysteme werden gewöhnlich als

- Stammkomponente / Komponente A: Epoxidharz (im Wesentlichen Bisphenol A/F, Epichlorhydrin) und
- Härter / Komponente B: Polyamine, Polyaminadukkte, Polyaminoamide

ausgeliefert.

Je nach Formulierung enthält Komponente A und/oder Komponente B zusätzlich unterschiedliche Löse-, Modifizierungsmittel, reaktive Verdünner, Beschleuniger, Weichmacher und Füllstoffe. Als Lösemittel werden z. B. Benzol, Xylole, Alkohole, Ester, Ether oder Ketone eingesetzt. Um eine er-

hebliche Verschlechterung der Feststoffeigenschaften zu vermeiden, sollten diese Stoffe bei der Polyaddition von Harz- und Härterkomponenten vollständig entweichen können. Dies ist jedoch bei den in der Baupraxis vorherrschenden Umgebungsbedingungen unrealistisch. Modifizierungsmittel sind z. B. Benzylalkohol oder Nonylphenol. Die Reaktivverdünner sind niedrigviskose Flüssigkeiten mit reaktiven Gruppen, die im Zuge der Polyaddition ins Makromolekül eingebaut werden. Vorzugsweise werden Produkte auf Glycidetherbasis eingesetzt. Als Füllstoffe werden häufig Quarzmehl, Kreidemehl und Talk verwendet.

Die Anlieferung der Komponente A und Komponente B erfolgt getrennt in Gebinden. Die Lagerzeit ist bei Luft- und Lichtabschluss in kühlen Räumen je nach Typ auf rund sechs Monate, teilweise 12 Monate, begrenzt. Harz und Härter werden nach Herstellervorschrift gemischt. Die Verarbeitungszeit der Mischung ist begrenzt und kann den jeweiligen Produktdatenblättern entnommen werden.

Für Beschichtungen relevante kalthärtende Epoxidharze vernetzen erfahrungsgemäß unter Gebrauchstemperaturen (etwa 5 °C bis 30 °C) nicht vollständig. Die zeitliche Entwicklung des Vernetzungsgrades wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Neben der Zusammensetzung beeinflussen u. a. Temperatur, Feuchtigkeit und das alkalische Milieu der Betonoberfläche den Vernetzungsgrad.

Die Bestimmung des Vernetzungsgrades eines Epoxidharzes kann anhand von DSC-Analysen (Differential Scanning Calorimetry) erfolgen. Hierbei wird eine Probe in einem Temperaturbereich von z. B. -50 °C bis 250 °C erwärmt und die Differenz der zugeführten Wärmeenergie im Vergleich zu einer thermisch inerten Referenzprobe ermittelt (Wärmefluss in Abhängigkeit von der Temperatur). Dieser Versuch wird an einer Probe mehrmals durchgeführt. Infolge des ersten Aufheizens (1. DSC-Fahrt) kann eine Probe, die bisher bei etwa 5 °C bis 30 °C gelagert wurde, nachvernetzen. Ist dies der Fall, wird sich der Wärmefluss über die Temperatur in der 2. DSC-Fahrt verändern (Bild 2–9). Mit weiteren DSC-Fahrten an der gleichen Probe kann untersucht werden, ob die Vernetzung durch das mehrmalige Aufheizen zunimmt.

Bild 2–9 zeigt DSC-Fahrten an einer Epoxidharzgrundierung, die als freier Film bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte hergestellt wurde. Der Anteil an nicht-reaktiven Komponenten (Nonylphenol) betrug 3 M.-% bezogen auf die Gesamtmasse. Bei der ersten Fahrt trat bei etwa 55 °C eine deutliche endotherme Reaktion auf, die während der 2. und 3. Fahrt nicht mehr vorhanden war. Diese Versuche zeigen eine Nachvernetzung des kaltherhärtenden Epoxidharzes /Wol07/.

POLYURETHANE

Polyurethane werden ebenso durch Polyaddition hergestellt. Hierbei lagern (Di- bzw. Poly-)Isocyanate Reaktionspartner mit jeglicher Art von reaktivem Wasserstoff (meist Polyole) additiv an. Je nach PUR-System können zusätzliche Vernetzungsmittel notwendig sein.

Polyurethane weisen je nach Ausgangskomponenten eine große Vielfalt auf: Thermoplaste entstehen aus Diisocyanaten und zweiwertigen Alkoholen, z. B. Ethylenglykol, Butandiol. Elastomere und Duroplaste entstehen durch Polyaddition von Di- und Triisocyanaten an höhermolekulare Alkohole bzw. verzweigte Polyester. Die Härte dieser Polyurethane ist über die Anteile von zwei- und dreiwertigen Alkoholen einstellbar. Diese Polyurethane gibt es auch als Schäume.

Für Beschichtungen werden Polyurethane überwiegend als Reaktionsharze vor Ort eingesetzt. Hierbei werden die Ausgangsstoffe in Komponente A (häufig das Polyol) und in Komponente B (häufig die Isocyanate) eingeteilt.

Es besteht jedoch ebenfalls die Möglichkeit, eine Härtung der Isocyanate durch Zugabe von Aminen durchzuführen. Als Reaktionsprodukt dieser Addition entstehen Harnstoffe.

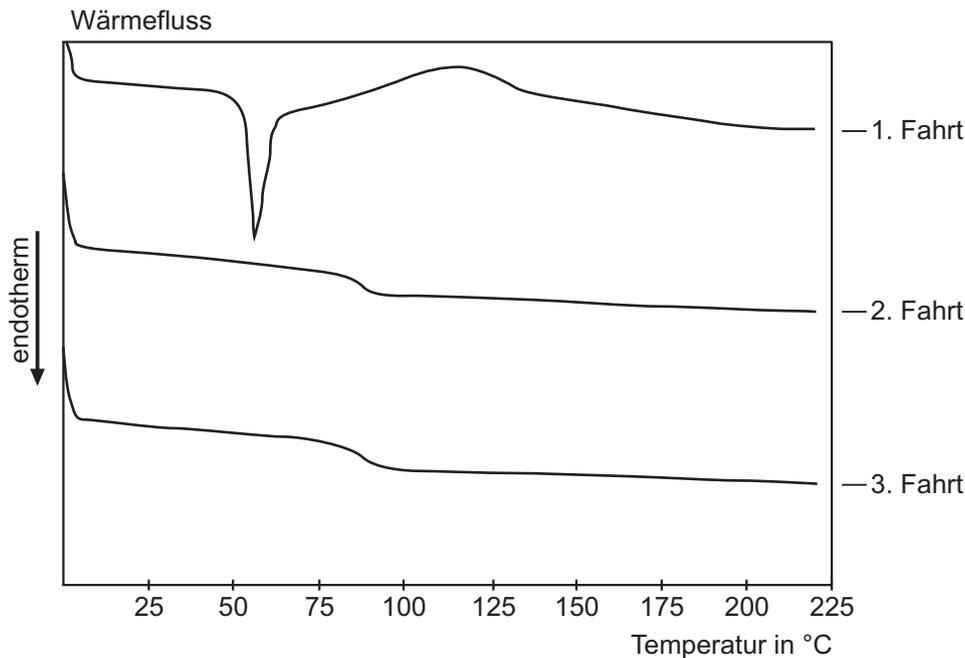


Bild 2–9: DSC-Fahrten von einem Epoxidharz mit 3 M.-% Nonylphenol bzgl. auf die Gesamtmasse /Wol07/

Die dritte Reaktionsmöglichkeit von grundlegender Bedeutung stellt die Umsetzung der Isocyanate mit Wasser dar. Da das Primäradditionsprodukt (Carbaminsäure) nicht beständig ist, zerfällt es unter Abspaltung von CO_2 und bildet nach Addition einer zweiten Isocyanatgruppe symmetrisch substituierten Harnstoff. Insbesondere zur Herstellung geschäumter Polyurethane wird das abgespaltene Kohlendioxid als Treibgas genutzt, während die Polyharnstoffe ein hochmolekulares Gerüst aufbauen. Einkomponentige Polyurethane, deren Isocyanate mit Luftfeuchtigkeit oder Restfeuchte in Poren bzw. Rissen des Substrates reagieren, basieren ebenfalls auf dieser Reaktion. Aufgrund der zumeist sehr niedrigen Härtungsgeschwindigkeit kommt es im Falle sehr dünner Schichten nicht zu störenden Blasenbildungen durch das entweichende Kohlendioxid.

Auf der Seite der Isocyanate stehen aromatische, aliphatische oder cyclophatische Produkte zur Verfügung. Aufgrund der wesentlich höheren Reaktionsfähigkeit und der im allgemeinen wirtschaftlicheren Zugänglichkeit kommt den aromatisch gebundenen Isocyanatgruppen die größte Bedeutung zu. Auf aliphatische Isocyanate wie Hexamethylendiisocyanat (HDI) oder cycloaliphatische Isophorondiisocyanate (IPDI) wird nur zurückgegriffen, wenn spezifische Reaktivitäten für den Aufbau günstig sind oder spezielle Eigenschaftsanforderungen an die Endprodukte, wie z. B. Lichtehtheit bei Lacken und Beschichtungen für Fahrzeuge, nur mit Aliphaten erreichbar sind. Das weltweit in größter Menge produzierte Isocyanat ist das aromatische Diisocyanat Toluylendiisocyanat (TDI). Das zweite große aromatische Diisocyanat ist das Diphenylmethandiisocyanat (MDI) /Die83/.

Bei PUR-Beschichtungen werden neben den zuvor beschriebenen Zusatzstoffen Lösemittel, teilweise mit einem Anteil oberhalb von 50 %, eingesetzt. Als Lösemittel sind wasser- und alkoholfreie polare Stoffe, wie z. B. Ester, Ketone und Etherester, geeignet. Aromaten wie Toluol und Xylol oder auch aromatische Spezialbenzine können anteilig mit verwendet werden. Flüssige und besonders niedrigviskose Polyole und Polyisocyanate ermöglichen es, den Lösemittelanteil bis auf etwa 20 % zu reduzieren. Hierbei handelt es sich um so genannte „High solids“ Systeme. Seit einigen Jahren gibt es auch wässrige, lösemittelfreie Zweikomponenten-Polyurethan-Beschichtungsmaterialien /Sti07/. Derartige Produkte werden durch Polyoldispersionen, in denen das Polyisocyanat möglichst homogen vermischt

wird, erzielt. Die Verarbeitungseigenschaften des Beschichtungstoffes während der Topfzeit, die bis zu 8 Stunden betragen kann, bleiben gegenüber herkömmlichen Systemen relativ unverändert /Sti07/.

KOMBINATIONEN VON EPOXIDHARZEN UND POLYURETHANEN

Eine interessante Variante auf dem Beschichtungssektor sind Kombinationen von aminhärtenden Epoxidharzen mit Polyurethanen. Als PUR-Vorprodukt liegen in diesem Falle blockierte NCO-Prepolymere vor. Das für die Epoxidharzhärtung eingesetzte Amin bewirkt unter Verdrängung des Blockierungsmittels eine Vernetzung über Harnstoffgruppen. Auf diese Weise werden PUR- und Epoxidharzsegmente miteinander verknüpft.

Geeignete NCO-Prepolymere liefern Endprodukte mit Elastomercharakter. Elastizität und Flexibilität lassen sich in Abhängigkeit vom Verhältnis PUR : EP in weiten Bereichen einstellen (Bild 2–10). Somit bietet die Kombination von aminhärtenden Epoxidharzen mit Polyurethan eine gewisse Gummielastizität bei gleichzeitiger mechanischer und chemischer Belastbarkeit. Dieses Material ist insbesondere im Bereich verschleißfester, rissüberbrückender Beschichtungssysteme eine Alternative. Es wird jedoch zurzeit nicht am Markt verwendet.

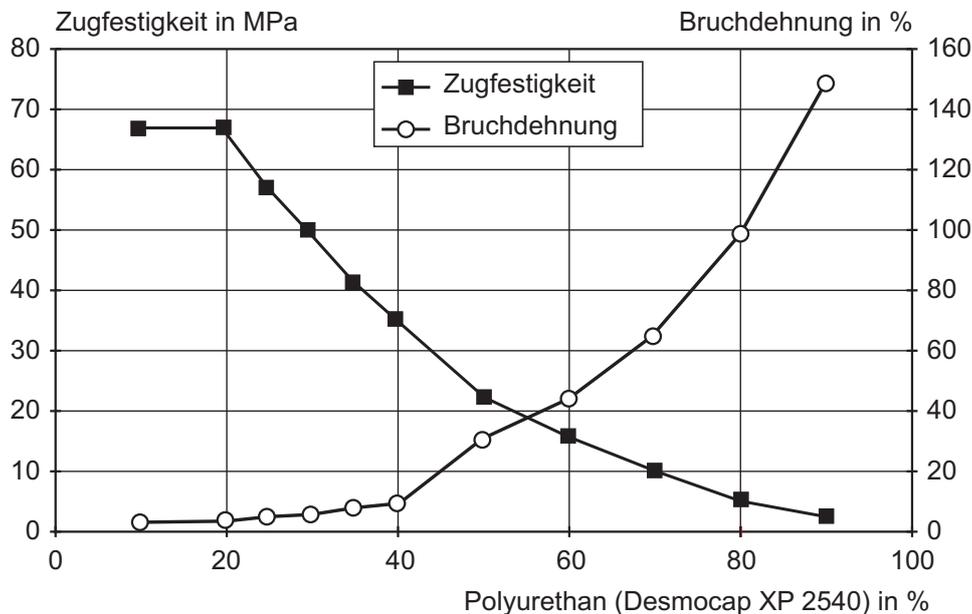


Bild 2–10: Zugversuche an Polyurethan-Epoxidharz-Systemen /Mag04/

ACRYLATE

Acrylharze werden durch Polymerisation hergestellt. Sie beinhalten als überwiegenden Monomer-Bestandteil Ester der Acryl- bzw. Methacrylsäure. Zusätzlich können sie reaktive Gruppen wie Carboxyl-, Hydroxyl-, Amid-, Amino- und Epoxidgruppen beinhalten. Die Härtung der Monomere erfolgt mittels radikalisch gestarteter Polymerisation über Warmhärtung, Kalthärtung, Lichthärtung oder durch energiereiche Strahlung. Die Eigenschaften der Polymere werden von Zusammensetzung, Polymerisationsgrad und ganz entscheidend von der Größe der Ester-Alkylgruppen beeinflusst.

Acrylate werden sowohl in Lösungen (organische Lösemittel) als auch in wässrig dispergierter Phase für Beschichtungen verwendet. Auf Dispersionen, auch Acrylatdispersionen, wird nachfolgend eingegangen.

POLYMERDISPERSIONEN

Unter einer Dispersion versteht man ein aus mindestens zwei Phasen bestehendes System (disperses System), bei dem eine Phase (dispergierte Phase) in einer zweiten Phase, dem Dispersionsmittel, verteilt ist /Ben03/. Bild 2–11 verdeutlicht den Begriff. Nachfolgend werden ausschließlich Polymerdispersionen, die unter den Begriff Suspensionen fallen, behandelt.

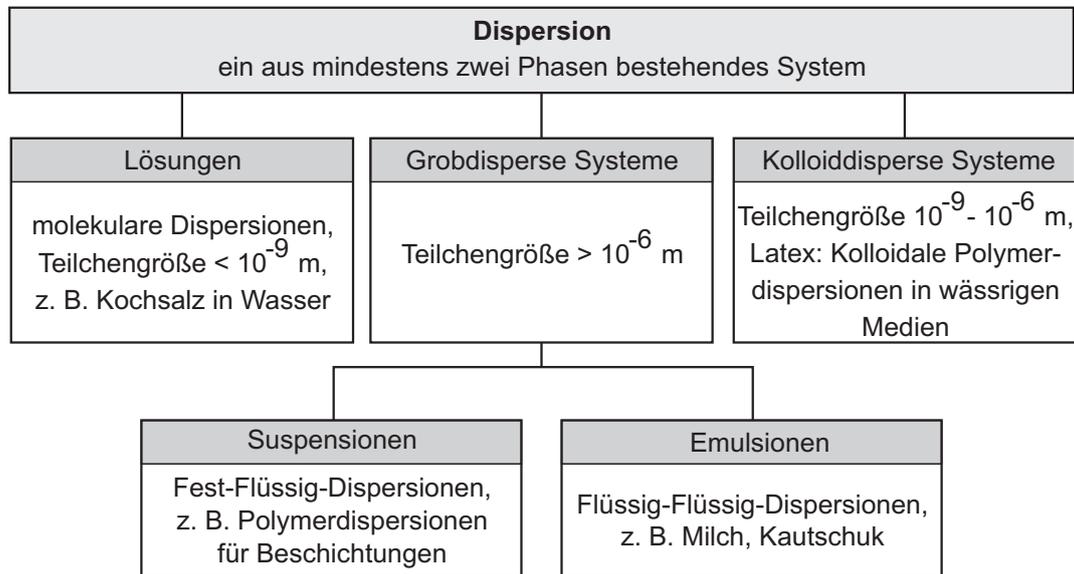


Bild 2–11: Erläuterung des Begriffs Dispersion

Übliche Polymergehalte in Polymerdispersionen für Beschichtungen liegen zwischen 40 und 55 % bei einer Teilchengröße von 100 bis 500 nm. Im Wesentlichen bilden Acrylate und Copolymerisate die Basis derartiger Dispersionen. Copolymerisate werden durch Polymerisation verschiedener Monomere hergestellt. Insbesondere Acrylat und Styrol/Acrylat finden Anwendung für Dispersions-Beschichtungen. Styrol/Butadien-Dispersionen sind hingegen gegenüber Wärme und UV-Strahlung anfällig, sie werden deswegen vorwiegend in PCC's (Abschnitt 2.4.4) eingesetzt /Kit05/.

Da Polymerdispersionen i.d.R. einkomponentig sind, sind sie hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit leichter handhabbar als zweikomponentige Reaktionsharze. Allerdings ist auf das Einhalten der Mindestfilmbildetemperatur (i.d.R. > 5 °C) sowie der Möglichkeit des Entweichens des Dispersionsmittels (im Allgemeinen Wasser) zu achten.

Durch die Verdunstung bzw. das kapillare Saugen des Untergrundes entweicht das Dispersionsmittel und die Konzentration an Polymerteilchen steigt. Dadurch lagern sich diese dichter aneinander. Ab einer bestimmten Teilchendichte versagen bei den Dispersionen die stabilisierenden Kräfte der Schutzkolloide und Emulgatoren, die Dispersion bricht. Oberhalb der Mindestfilmbildetemperatur fließen die Polymerteilchen dann ineinander und bilden einen Film. Kommen keine reaktiven Monomere zum Einsatz, wird ein thermoplastischer Kunststoff gebildet, die Kettenmoleküle lagern sich aneinander und verknäulen. Äußerlich ist dieser Prozess daran zu erkennen, dass die weißliche Dispersion in einen transparenten Film übergeht. Bild 2–12 verdeutlicht den Prozess der Filmbildung. Die Filmbildung ist aufgrund der „physikalischen Verfilzung“ der Polymere ein irreversibler Vorgang. Der Film kann i. d. R. nicht durch Zugabe von Wasser gelöst werden. Unterhalb einer für jede Dispersion charakteristischen Temperatur, der so genannten Mindestfilmbildetemperatur, trocknet das System nur zu einer pulvrigen Masse aus, da aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit der Partikelmoleküle bei niedriger Temperatur ein Zusammenfließen der Partikel nicht mehr möglich ist.

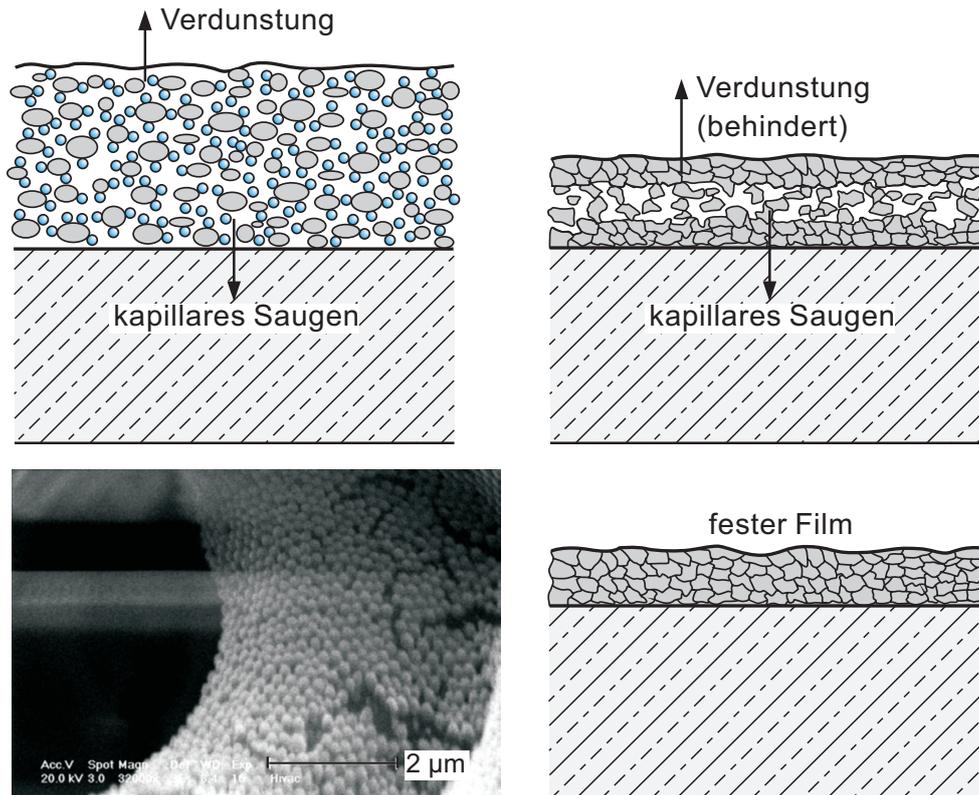


Bild 2–12: Entstehung eines Polymerdispersionsfilms. Die Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Dr. M. Puterman verdeutlicht das Zusammenrücken der Polymerteilchen

Grundsätzlich wird der Filmbildeprozess maßgeblich von den klimatischen Randbedingungen beeinflusst. Um bei der Charakterisierung der Filme reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen, müssen Parameter wie Nassschichtdicke, Trocknungstemperatur, Luftfeuchte und Konvektion sowie Trocknungs- und Lagerzeit kontrolliert werden. Bei schneller Trocknung kann insbesondere die Bildung einer „Haut“ (Austrocknen und Verfilmen der Dispersion an der Oberfläche) eine definierte Trocknung der darunter befindlichen Dispersion erschweren.

Polymerdispersionen nehmen Wasser auf, was zu Auswaschungen löslicher Bestandteile, Quellen, höherer Dehnfähigkeit und verminderter Festigkeit des Films führen kann (Bild 2–13). Je hydrophiler das Polymer, desto höher ist die Wasseraufnahme unter sonst gleichen Bedingungen. Hydrophobe Filme aus Styrol- oder Butadienpolymerisaten nehmen kaum Wasser auf. Bei Polymeren, in denen hydrophile und hydrophobe Gruppen vorliegen, wie in Methacrylat und Ethylacrylat, hängt die Wasseraufnahme von der Wirkung der einzelnen Gruppen sowie vom Hilfsstoffsystem ab /Kit05/.

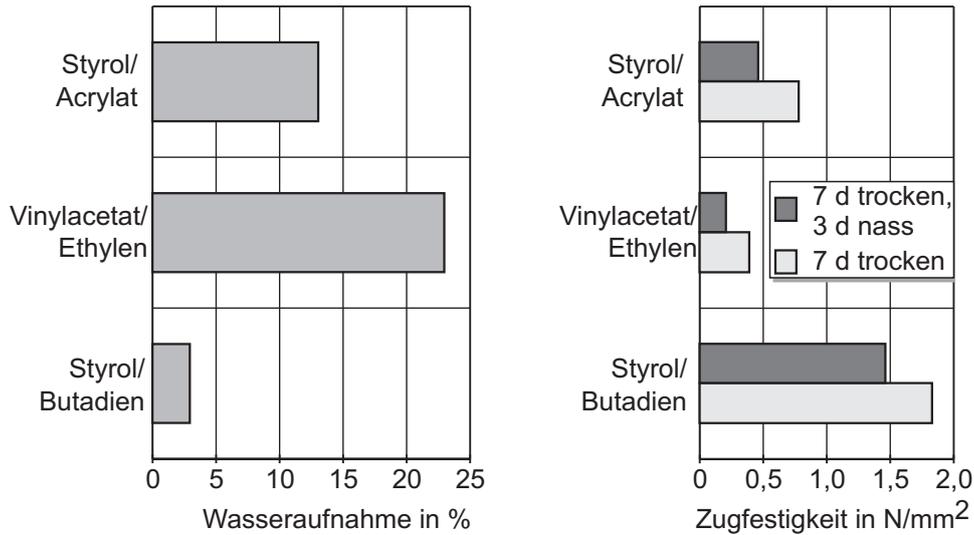


Bild 2-13: Wasseraufnahme und Zugfestigkeit von Dispersionsfilmen /Pak06/

2.4.3 SILIZIUMORGANISCHE VERBINDUNGEN

HYDROPHOBIERUNGSMITTEL

Für Hydrophobierungsmittel werden reaktive Siliziumverbindungen aus dem Grundstoff Chlor-silan eingesetzt, da diese auf der mineralischen Oberfläche polykondensieren, d.h. ein Silikonharz bilden. Diese so genannten siliziumorganischen Verbindungen bestehen aus einer Hauptkette aus Silizium (Si) und Sauerstoff (O), an die unterschiedliche organische Reste (R) in Form von Alkylgruppen ($C_nH_{(2n+1)}$) und OH-Gruppen angebunden sind. Bei Berührung mit einer silikatischen Oberfläche lagert sich die hydrophile Hauptkette mit ihren Silanolgruppen (Si-OH) an diese an, während die hydrophoben Kohlenwasserstoff-Seitenketten die neue Oberfläche bilden (Bild 2-14). Der entstehende Film ist extrem dünn. Die „Schichtdicke“ ist für die Wirksamkeit ohne Bedeutung, sehr wichtig dagegen ist die Auskleidung aller Porenwandungen. Eine Mindesteintragsmenge an Wirksubstanz je m^2 Betonoberfläche ist daher erforderlich.

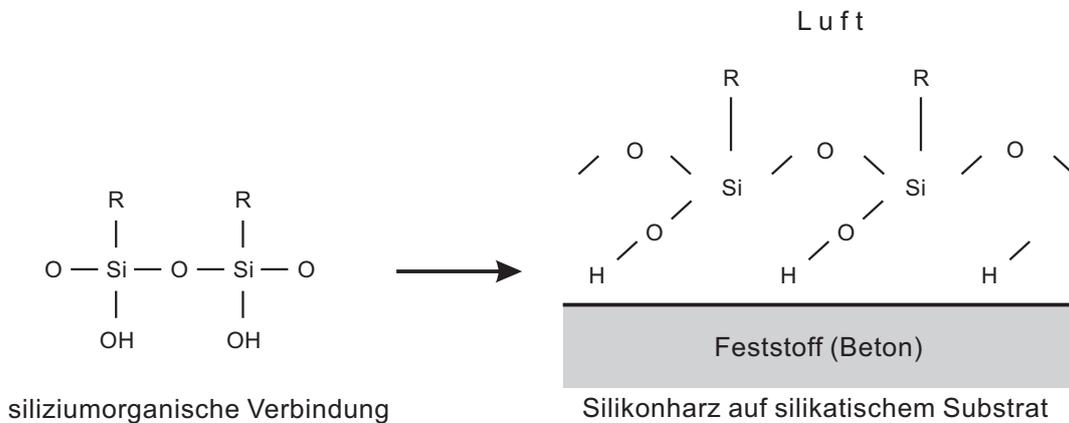


Bild 2-14: Schematisches Wirkprinzip einer siliziumorganischen Verbindung auf mineralischen Oberflächen

Für die Verträglichkeit mit dem Beton sind vor allem die an die Si-O-Hauptkette angebondenen organischen Seitenketten wichtig. Handelt es sich um Methylgruppen (CH_3), so ist die Wirksamkeit auf neutralen bis leicht alkalischen Untergründen (Natursteine, karbonatisierter Putz und Beton) gut. Bei längeren Alkylgruppen (C_4H_9 bis C_8H_{17}) ist die Beständigkeit auf alkalischen Substraten besser, auf neutralem dagegen eher ungünstiger.

2

Ausgangs- und Endprodukte aller handelsüblichen siliziumorganischen Hydrophobiermittel sind gleich. Aus dem Rohstoff Chlorsilan werden Silikonate, Silikonharze, Silane und Siloxane hergestellt. Durch chemische Reaktion auf der Baustoffoberfläche und/oder Verdunsten des Lösemittels entstehen in allen Fällen Silikonharze als wirksame Substanzen.

Marktübliche Produkte bestehen im Wesentlichen aus Silanen oder einem Gemisch aus Silanen und Siloxanen. Zur Hydrophobierung von zementgebundenen Baustoffen werden heute vorwiegend Wirkstoffe auf Alkylalkoxysilan-Basis eingesetzt. Silane und Siloxane können entweder unverdünnt oder verdünnt auf den Baustoff aufgetragen werden. Werden sie mit organischen Lösemitteln wie Alkoholen oder Benzinkohlenwasserstoff verdünnt, lassen sich drei Gruppen je nach Wirkstoffkonzentration unterscheiden:

- Wirkstoffgehalt kleiner 10 %,
- Wirkstoffgehalt zwischen 10 und 20 % und
- Wirkstoffgehalt zwischen 20 und 40 %.

Wirkstoffgehalte kleiner 5 % werden als zu gering eingestuft /*Wol96/*, /*Ger02/*.

Um umweltschädliche Lösemittel durch Wasser zu ersetzen, ist die Zugabe von Emulgatoren notwendig. Es wird zwischen „Wasser in Öl“ Emulsionen (Wirkstoffgehalt > 50 %) oder „Öl in Wasser“ Emulsionen (Wirkstoffgehalt < 50 %) unterschieden. Die Leistungsfähigkeit der „Öl in Wasser“ Emulsionen wird allerdings durch geringe Eindringtiefen und der Trennung von Wirkstoff und Wasser auf der Baustoffoberfläche, das so genannte Brechen der Emulsion, reduziert /*Ger02/*.

Im Gegensatz dazu erreichen hochviskose „Wasser in Öl“ Emulsionen mit einem Wirkstoffgehalt zwischen 70 und 80 % hohe Eindringtiefen /*Mei02/*. Die in den so genannten Cremes oder Pasten enthaltenen Silane bzw. Silan-Siloxan-Gemische sind weniger flüchtig. Die Wirkstoffe können im Verlauf mehrerer Stunden ohne Rückstände in den Untergrund eindringen und erreichen durch den hohen Wirkstoffanteil sowie die lange Einwirkzeit vergleichsweise hohe Eindringtiefen. Die wesentlichen Vorteile einer Creme sind zum einen die problemlose Applikation an senkrechten Fassadenflächen oder bei Über-Kopf-Arbeiten und zum anderen die geringe Flüchtigkeit des Wirkstoffs, was besonders bei trockenen und stark saugenden Betonoberflächen relevant ist. Weiterhin bieten Cremes und Pasten den Vorteil, dass äußerlich leicht erkennbar ist, ob alle zu hydrophobierenden Flächen auch behandelt wurden.

POLYALKOXYSILOXAN UND SILICATFARBEN

Durch die Umsetzung der Ausgangsstoffe Siliciumtetrachlorid mit Ethylalkohol werden, je nach Reaktionsführung, Kieselsäureester verschiedener Molekülgrößen und Formen als Basisprodukte für Steinfestiger erhalten. Bei den Basisprodukten unterscheidet man zwischen der monomeren Verbindung (Tetraethylsilikat bzw. Tetraethoxysilan – TEOS) und höhermolekularen Verbindungen (Polyalkoxysiloxanen). Eine Weiterentwicklung des TEOS ist das hochverzweigte Polyethoxysiloxan PEOS, welches zur Erhöhung der Dichte und Widerstandsfähigkeit von Betonoberflächen verwendet werden kann /*Wei09/*.

Für die Anwendungen werden gegebenenfalls Lösemittel wie Ethylalkohol oder Ketone zur Verdün-

nung und Katalysatoren zur Beschleunigung zugegeben. Aufgrund der geringeren Viskosität bei vergleichbarem Silikatgehalt, kann beim PEOS zum Teil auf Lösemittel verzichtet werden. Nach der Applikation verdampft das Lösemittel. Im Kontakt mit vorhandener oder durch Diffusion bereitgestellter Feuchte beginnt der Kieselsäureester unter Alkoholabspaltung zu hydrolysieren. Die dabei entstandene freie Kieselsäure kondensiert unter Abspaltung von Wasser zu Siloxanen, die bei weiterem Reaktionsfortschritt amorphes SiO_2 (Kieselgel) bilden. In Alkalien reagieren Polyalkoxysiloxane zu Silikaten, die im feuchten Beton mit Ca^{2+} Ionen Calciumsilikathydrate bilden können /Wei09/.

In Gegenwart von Wasser oder Alkalien werden somit SiO_2 -Teilchen oder Filme, je nach Art und Beschaffenheit des Untergrundes und der Reaktionsbedingungen gebildet. Als Schichten aufgetragen werden nach Kondensation und Vernetzung Beschichtungen erzeugt, die Oberflächen vor schädlichen Einflüssen schützen können. Die Materialien können zum Teil jedoch auch kapillar in die Porenräume des Betons eindringen und dort infolge einer Verdichtung des Porengefüges den Wassertransport reduzieren sowie die Betonrandzonen verfestigen /Orl05b/.

Das Bindemittel von Silikatfarben ist ein kaliumhaltiges Alkalisilikat (Kaliwasserglas). Zur Herstellung fester Kaliwassergläser werden Gemenge aus Quarzsand und Kaliumcarbonat unter CO_2 -Entwicklung bei 1100 °C bis 1200 °C verschmolzen. Das abgekühlte Glas wird zu einem Pulver gemahlen. Daraus wird durch Lösen in Wasser bei hohen Temperaturen (z. B. 150 °C bei 5 bar Druck) flüssiges Wasserglas als klare, kolloide alkalische Lösung oder auch als alkalisches Gel (gallertartige bis feste Masse) gewonnen. Das applizierte Kaliwasserglas bildet mit Kohlenstoffdioxid aus der Luft Metakieselsäure, die wiederum zu Schichtsilikaten kondensiert.

Neben dem Bindemittel bestehen mineralische Silikatfarben im Allgemeinen aus Pigmenten und Füllstoffen. Dispersionssilikatfarben beinhalten zusätzlich Polymerdispersion bis zu 5 % bezogen auf die Gesamtmenge des Materials. Mittels Zusätzen zur Polymerdispersion können diese Farben im Werk gemischt werden. Sie sind leichter verarbeitbar als 2komponentige Silikatfarben.

2.4.4 ZEMENTGEBUNDENE SYSTEME

DIE BASIS

Die Hauptbindemittelkomponente zementgebundener Oberflächenschutzsysteme stellt der Zement dar. Mit der Zugabe von Wasser beginnt der Zement zu hydratisieren. Bei der Hydratation der Zemente bilden sich aus den im Wesentlichen verwendeten Rohstoffen CaO , Al_2O_3 , SiO_2 und Fe_2O_3 bzw. den hieraus durch die Herstellung erzeugten Hauptverbindungen, unterschiedliche Hydratphasen aus:

- Calciumsilikathydrat (CSH-Phasen)
- Calciumaluminathydrat
- Calciumaluminatferrithydrat

Die CSH-Phasen sind für die Festigkeitsbildung des Zementes maßgebend.

Bei der Hydratation der Calciumsilikate spaltet sich freies Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ab. Dieses geht mit anderen Alkalien teilweise in Lösung, wodurch sich in der Porenlösung ein pH-Wert von rd. 12,5 bis 13,5 einstellt /Schi96/. Die Ausbildung des Porenraums im Zementsteingefüge hängt wesentlich vom Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) ab. Aus der Umgebungsluft eindringendes Kohlenstoffdioxid CO_2 wandelt das Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jedoch sukzessive an der Betonrandzone über Jahrzehnte hinweg in Calciumcarbonat (CaCO_3) um, was mit einer Senkung des pH-Wertes auf unter

9 einhergeht /Wes93/. Die Geschwindigkeit der Karbonatisierung wird in erster Linie vom Transport der Reaktionspartner (CO_2 und $\text{Ca}(\text{OH})_2$) bestimmt. Weitere Einflussparameter sind Bindemittelzusammensetzung, Qualität der Betonoberfläche und Klima. Die Bildung von kristallinem CaCO_3 erhöht die Dichtigkeit des Zementsteins, da Calcit gegenüber $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ein 11 % größeres Volumen einnimmt. Dadurch kann je nach Zementart zum einen die Festigkeit in der Betonrandzone erhöht werden, zum anderen kann die Verdichtung des Porengefüges die Karbonatisierungsgeschwindigkeit reduzieren.

Die Gesteinskörnung ist das Korngerüst des zementgebundenen Instandsetzungsstoffes. Anhand der Gesteinskörnung erfolgt eine Einteilung in die Gruppen Mörtel und Beton: Mörtel weisen ein maximales Größtkorn von 4 mm auf, während Betone aus einem Größtkorn oberhalb von 4 mm bestehen. Aufgrund der zumeist angestrebten geringen Schichtdicken und der Forderung nach einer minimalen Schichtdicke in Abhängigkeit vom Größtkorn (Faustformel: min. Schichtdicke \sim 3faches Größtkorndurchmesser) werden überwiegend Mörtel als zementgebundene Oberflächenschutzsysteme verwendet.

Neben Zement, Gesteinskörnung und Wasser werden zementgebundenen Systemen häufig Zusatzstoffe, wie Flugasche, Silicastaub, Hüttensand, Gesteismehl, Kalkhydrat, Trass und Pigmente, sowie Zusatzmittel zugegeben. Zusatzmittel sind u. a. Fließmittel, Entschäumer und Luftporenbildner.

SPRITZMÖRTEL UND -BETON

Erfolgt die Verarbeitung unter Einsatz von Spritzenergie wird von Spritzmörteln bzw. Spritzbetonen gesprochen. Da hierbei keine Schalung erforderlich ist, kann eine im Vergleich zum herkömmlichen Betonieren größere Menge pro Zeiteinheit verarbeitet werden. Der hohe Anpralldruck bedingt im Allgemeinen einen guten Verbund zum Untergrund. Für das großflächige Auftragen von Mörtelschichten wird somit überwiegend Spritzmörtel verwendet.

Ein Auftrag des Spritzmörtels kann im Trocken- oder Nassspritzverfahren erfolgen. Beim Trockenspritzverfahren wird das Anmachwasser dem durch Schläuche zur Einbaustelle geförderten Trockengemisch erst in der Düse zugegeben. Der Düsenführer regelt die Wasserzugabe in Abhängigkeit vom Förderstrom. Ein definierter w/z-Wert lässt sich somit beim Trockenspritzverfahren nicht einhalten. Eine optimale Spritzbetonkonsistenz wird durch einen erfahrenen Düsenführer bei einem w/z-Wert von etwa 0,5 erreicht. Ein höherer Wassergehalt reduziert die Haftung zum Untergrund, während niedrigere Wassergehalte zu einem Anstieg des Rückpralls und der Staubentwicklung führen /Han05/. Die Qualität des Spritzbetons wird daher maßgeblich von der Verfahrenstechnik und der Qualifikation des Düsenführers bestimmt. Beim Nassspritzverfahren wird der Beton inklusive des Wassers in der Regel direkt aus dem Mischer in die Spritzmaschine gegeben und zur Einbaustelle gefördert. Dadurch werden Schwankungen im w/z-Wert vermieden, allerdings sinkt die Verarbeitbarkeitsdauer und der Reinigungsaufwand für die Maschinen und Schläuche steigt.

Das Einbringen und Verdichten des Betons erfolgt beim Spritzmörtel in einem Arbeitsgang. Dabei prallt ein Teil des Materials wieder zurück. Beim Spritzvorgang wird zunächst der Zementleim mit hoher Energie in den rauen Untergrund eingetrieben. Grobe Zuschläge prallen vom harten Untergrund zurück. Dieser Rückprall kann je nach Spritzrichtung und Mischungszusammensetzung zwischen 15 und über 30 % betragen /Han05/. Der Rückprall muss entsorgt werden und bedingt eine Veränderung des aufgetragenen Spritzbetons gegenüber der Ausgangsmischung. In der Verbundzone kommt es zur Zementanreicherung. Dies muss bei der Auslegung der Rezeptur berücksichtigt werden. Aufgrund des Rückpralls ist das Spritzen horizontaler Flächen im Allgemeinen nicht möglich.

POLYMERMODIFIZIERTE MÖRTEL

Mit Polymerdispersionen modifizierte Mörtel werden als PCC bezeichnet. Handelt es sich um Spritzmörtel werden sie SPCC genannt. Handelsübliche PCC weisen zum Teil nur geringe Polymeranteile von 0,05–0,10 M.-% bezg. auf den Zement auf. Für Laboruntersuchungen hinsichtlich des Effektes der Polymerzugabe werden im Allgemeinen höhere Polymergehalte, ≥ 5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt, verwendet.

Polymerdispersionen in Frischmörteln wirken i.d.R. verflüssigend und die Entmischungsneigung wird reduziert, was sich positiv auf die Verarbeitbarkeit auswirkt. Die Haftung des Frischmörtels zum Untergrund wird verbessert, die Haftzugfestigkeiten sind im Allgemeinen höher. Dies ist die hauptsächliche Motivation für den Einsatz von SPCC's als Oberflächenschutzsysteme. Während die Biegezugfestigkeit tendenziell durch die Polymerzugabe steigt, sinken Druckfestigkeit und E-Modul. Eine umfassende Charakterisierung von PCC's befindet sich in /Gie06/, /Bod08/.

Bei höheren Polymergehalten (mindestens 5 M.-%) kann der kapillare Wassertransport in polymermodifizierten Mörteln geringer sein, als bei nicht modifizierten Mörteln. Insbesondere hydrophobe Polymere können den Wassertransport herabsetzen.

2.4.5 GLAS

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG UND STRUKTUR DES GLASES

Unter Glas versteht man allgemein Stoffe im amorphen, nichtkristallinen Festzustand. Im engeren Sinne wird Glas definiert als anorganisch, meist oxidisches Schmelzprodukt, das durch einen Einfriervorgang ohne Auskristallisation der Schmelzphasenkomponenten in den festen Zustand überführt wird. Geht man davon aus, dass Flüssigkeiten eine ungeordnete Struktur haben, dann muss dies auch für das Glas als eingefrorene Flüssigkeit gelten. Auf dieser Grundlage wurden mit einigen Variationen und Erweiterungen mehrere Hypothesen über die Glasstruktur und die Bedingungen der Glasbildung entwickelt, die deshalb als Hypothesen zu bezeichnen sind, weil es bisher nicht möglich war, einen Beweis zu führen. Am fundiertesten erscheint die Netzwerkhypothese nach Zachariasen /Scho88/. Diese Netzwerkhypothese wird auch oft nach Zachariasen-Warren bezeichnet, da Warren /War41/ seine Röntgenaufnahmen mit dieser Hypothese gut deuten konnte.

Dementsprechend ist die Grundlage der Glasbildung das in Bild 2–15, links, gezeigte, durch SiO_4 -Tetraeder gebildete Netzwerk. Die Kationen, die derartige netzwerkbildende Polyeder aufbauen, werden als Netzworkebildner bezeichnet (z. B. Si, Ti, B). Die O_2 -Ionen stellen Brücken zwischen diesen benachbarten Kationen (hier: Si^{4+} -Ionen) dar. Der Einbau von Alkalioxid, wie Natrium- und Calciumoxid führt zu einer Aufspaltung des Netzwerkes, d. h. es liegen Trennstellen vor. Diese Trennstellenbildung bewirkt eine Schwächung der Glasstruktur, weil die Na-O-Bindung viel schwächer ist als die Si-O-Bindung /Scho88/. Kationen, die das Netzwerk abbauen oder verändern, werden Netzworkewandler genannt. Bild 2–15, rechts, zeigt eine vereinfachte ebene Darstellung der Struktur eines Kalk-Natron-Glases. Etwa 90 % der produzierten Glasmenge ist Kalk-Natron-Glas. Zwischenoxide wie Aluminiumoxid und Bleioxid können als Netzworkebildner und -wandler fungieren.

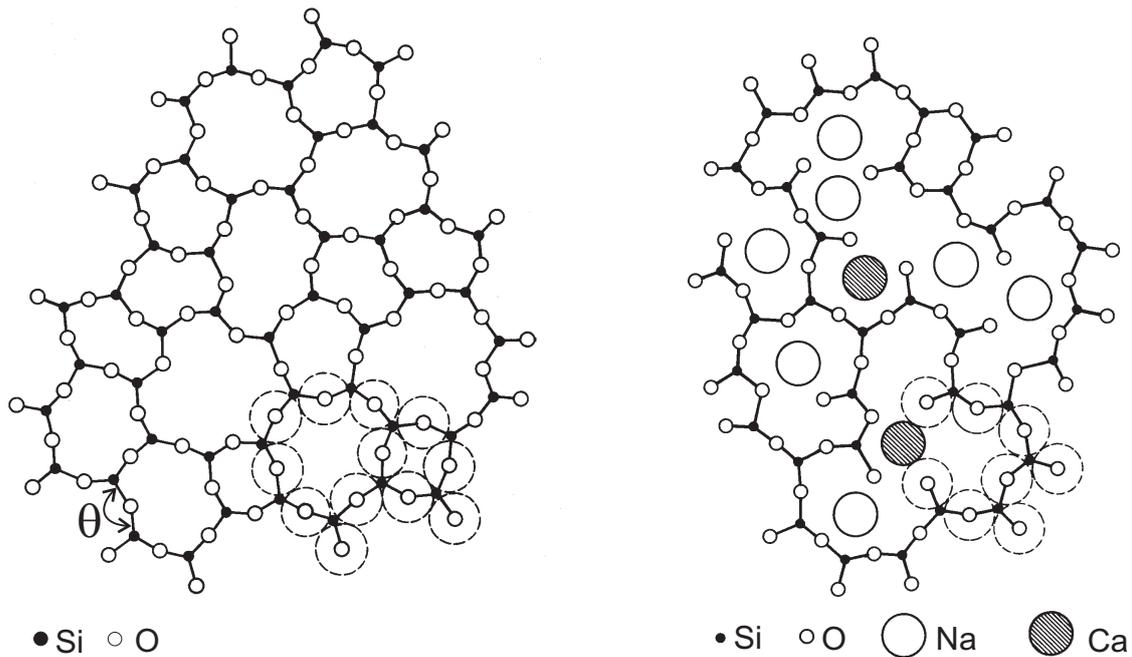


Bild 2-15: Ebene Darstellung eines unregelmäßigen SiO_2 -Netzwerks (links) und eines Kalk-Natron-Glases (rechts). Die vierten Valenzen der Siliziumatome ragen nach oben oder unten aus der Zeichenebene heraus, gestrichelt rechts unten der relative Flächenbedarf der Sauerstoffe /Scho88/

FLOATGLAS, EINSCHIEBENSICHERHEITSGLAS, DÜNNGLAS

Überwiegend wird heute Floatglas im Floatglasverfahren, einem kontinuierlichem Prozess zur Herstellung von Glasscheiben mit Dicken zwischen 2 und 24 mm, produziert. Die Zugfestigkeit des Floatglases kann durch ein erneutes Erhitzen auf knapp 620 °C und anschließender schlagartiger Abkühlung mit Luft etwa verdreifacht werden (Biegezugfestigkeiten steigen von rund 45 N/mm² auf 120 N/mm²). Nach einer derartigen Behandlung wird das Glas Einschiebensicherheitsglas (ESG) genannt. Sowohl Float- als auch ESG-Glasscheiben werden als Schutzschichten auf Betonoberflächen aufgeklebt.

Für Bildschirme (Handy, Monitore) werden Glasfolien mit Dicken unterhalb von 0,5 mm hergestellt. Derartiges Dünnglas ist begrenzt biegsam. Dünngläser aus Boro-Silikat-Glas mit Kantenlängen unterhalb von 50 cm, werden auch auf Betonoberflächen geklebt.

KONTINUIERLICHE GLASSCHICHTEN UNMITTELBAR AUF BETON

Es wurden auch verschiedene Methoden zur Herstellung kontinuierlicher Glasschichten unmittelbar auf Beton entwickelt. Diese gliedern sich in zwei Ansätze, nämlich dem Verglasen einer aufgebrauchten Fritte oder Schlickers und dem direkten Verglasen der Betonoberfläche. In beiden Fällen sind jedoch hohe Temperaturen notwendig, die den Betons derart schädigen, dass die Druck- und Biegezugfestigkeiten abnehmen.

Unabhängig von der Methode, mit der die kontinuierliche Glasschicht auf der Betonoberfläche erzeugt wird, treten bestimmte Defekte in der Schicht auf, die ihren Ursprung in einem oder einer Kombination der folgenden Effekte haben /Shc02/: raue und/oder heterogene Betonoberfläche, Freisetzung von Wasser und/oder Gasen aus dem Beton während der thermischen Beanspruchung, Unterschiede

in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und unvollständiges Benetzen der Betonoberfläche durch den Schlicker oder die Glasschmelze. Auf diesem Gebiet ist somit noch Grundlagenforschung erforderlich.

2.5 GEGENÜBERSTELLUNG DER KLASSISCHEN OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

Hinsichtlich ihrer Erscheinungsform werden drei Typen von Oberflächenschutzsystemen (OS-Systeme) unterschieden: Hydrophobierung, Versiegelung und Beschichtung. In Bild 2–16 sind die drei Typen dargestellt.

Hydrophobierungen bilden keinen sichtbaren Film und sollen das Erscheinungsbild der Betonoberfläche nicht verändern. Die Poren sind nicht gefüllt, das Material befindet sich an den Porenwänden. Ziel einer Hydrophobierung ist es, die Betonoberfläche wasserabweisend auszurüsten.

Versiegelungen dienen dazu, das Eindringen flüssiger oder gasförmiger Stoffe in den Beton weitgehend zu verhindern. Durch eine Versiegelung entsteht auf der Oberfläche ein ungleichmäßiger bis zu 300 µm dicker Film. Sie bestehen aus Stoffen auf der Basis von Epoxidharz, Polyurethan oder Acrylat.

Beschichtungen dienen dazu, das Eindringen flüssiger und gasförmiger Stoffe in den Beton zu verhindern, ein Austrocknen des Betons zu ermöglichen, den Beton vor mechanischen und chemischen Beanspruchungen zu schützen und/oder Risse zu überbrücken. Sie bilden eine geschlossene, 0,1 bis 5 mm dicke Schicht auf der Betonoberfläche. Beschichtungen sind in der Regel aus mehreren Schichten aufgebaut und werden daher auch als Beschichtungssysteme bezeichnet. Der Aufbau der Beschichtungen variiert entsprechend des verfolgten Zieles und den vorliegenden Randbedingungen.

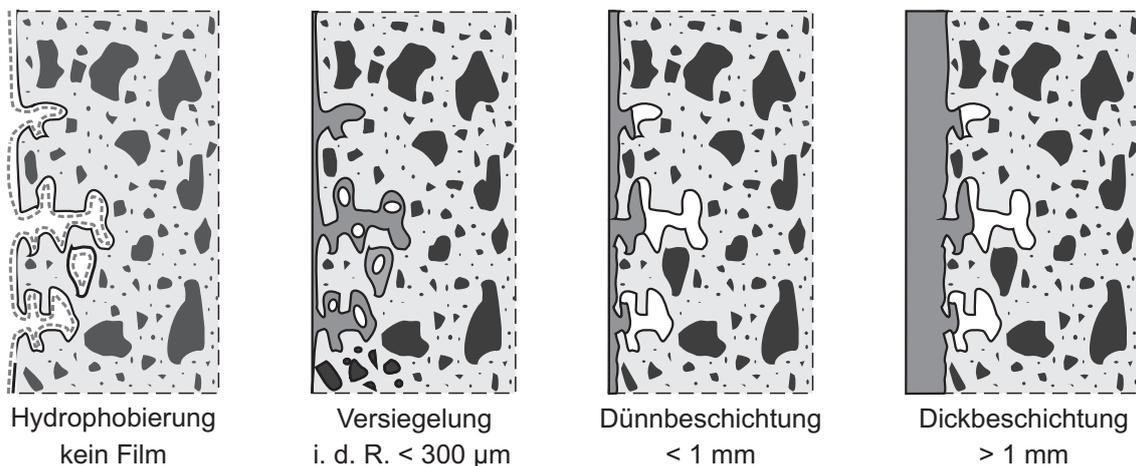


Bild 2–16: Schematische Darstellung einer Hydrophobierung, einer Versiegelung und einer Dünnschicht- sowie Dickbeschichtung

Hinsichtlich der Funktion werden folgende Arten von Oberflächenschutzschichten unterschieden: Kratz- und Ausgleichsspachtelungen, Grundierungen, hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschichten sowie Deckversiegelungen und Verschleißschichten.

Eine Kratz- bzw. Ausgleichsspachtelung soll

- die Rauheit der Betonoberfläche ausgleichen und
- Poren, Lunker und Kiesnester schließen,

damit die nachfolgenden Schichten in einer gleichmäßigen Schichtdicke aufgetragen werden können. Verwendet werden hierfür polymermodifizierte Zementmörtel oder Reaktionsharzmörtel mit einem Größtkorn bis 0,5 mm, in Ausnahmefällen bis 1 mm. Die Schichtdicke kann bis zu 3 mm betragen. Die Kratz- bzw. Ausgleichspachtelung fällt unter den Begriff Feinspachtel. Sie stellt das Bindeglied zwischen Betonersatzsystem und OS-System dar.

Eine Grundierung soll

- Poren verschließen und das Absaugen des Bindemittels nachfolgender Schichten verhindern,
- das Eindringen von Luft, Feuchtigkeit und beschichtungsschädlichen Stoffen (z. B. Alkalien) aus dem Beton in die nachfolgenden Oberflächenschutzschichten verhindern,
- den Beton im oberflächennahen Bereich verfestigen und
- den Verbund zu nachfolgenden Schichten herstellen.

Die hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschichten (hwO) haben eine oder mehrere der folgenden Funktionen:

- Wasserdampfdurchlässigkeit
- Wasserdichtigkeit
- Kohlenstoffdioxidichtigkeit
- Rissüberbrückung
- Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer bzw. chemischer Beanspruchung

Abschließend kann bei höher beanspruchten Oberflächenschutzsystemen eine Deckversiegelung folgen. Diese soll die hwO vor äußeren Einwirkungen schützen.

Die RL-SIB /DAf01/ hat zehn verschiedene OS-Systeme definiert. Diese sind in Bild 2–17 bis Bild 2–21 schematisch dargestellt. Bei den nicht dargestellten Systemen 7 und 10 handelt es sich um spezielle Systeme die Bestandteile von Brückenabdichtungen sind. Tab. 2–5 fasst die Systeme mit einer Kurzbeschreibung und den Anwendungsbereichen zusammen.

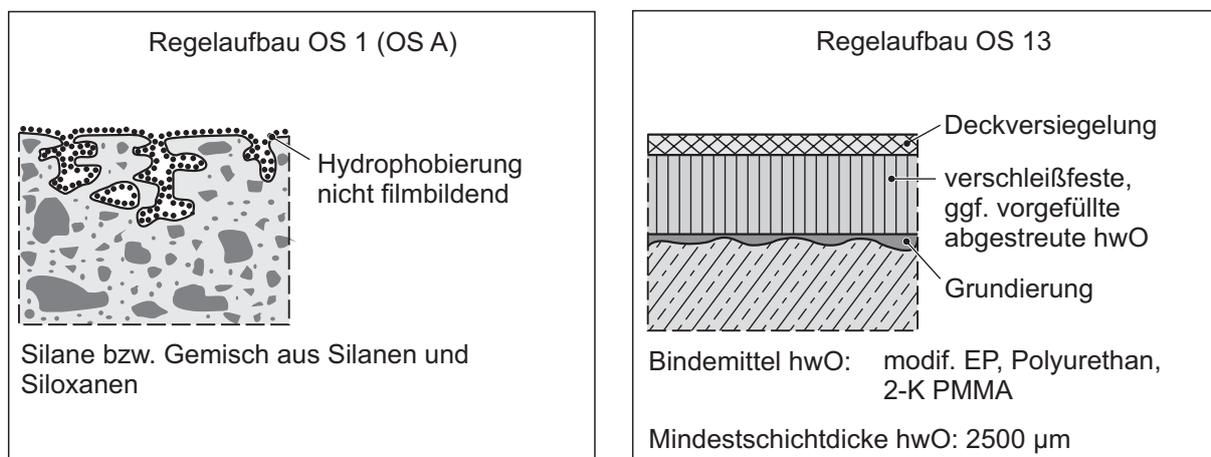


Bild 2–17: Schematischer Aufbau der klassischen Oberflächenschutzsysteme OS 1 und OS 13

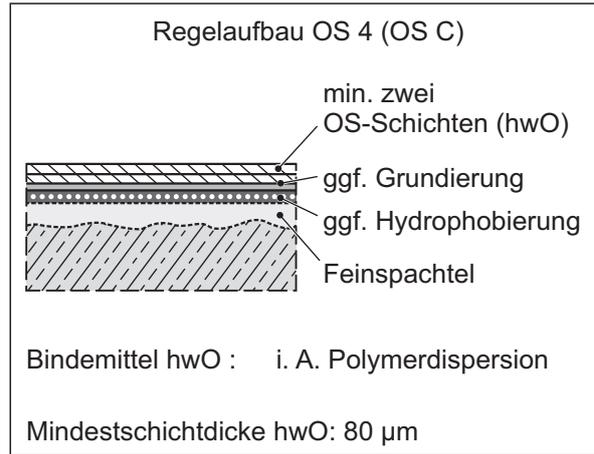
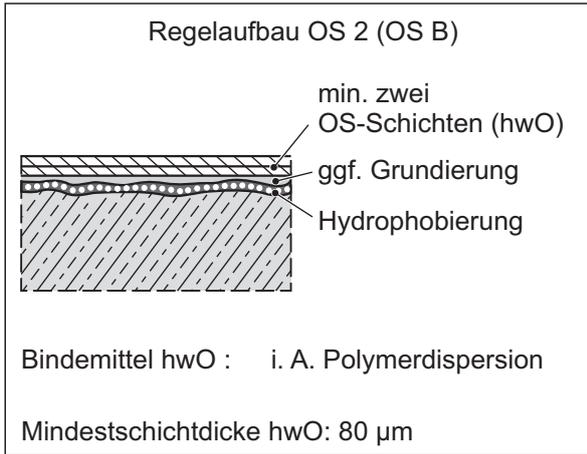


Bild 2-18: Schematischer Aufbau der klassischen Oberflächenschutzsysteme OS 2 und OS 4

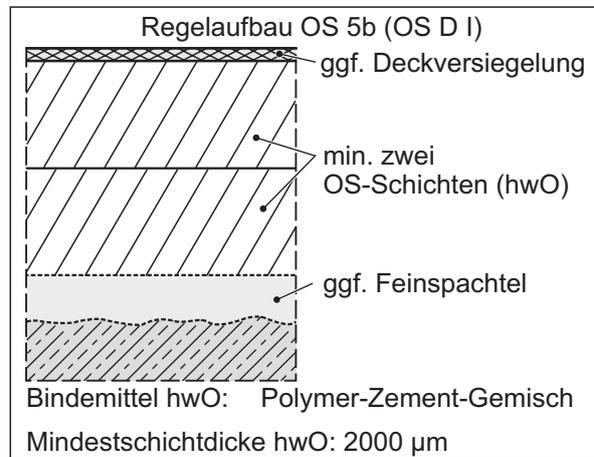
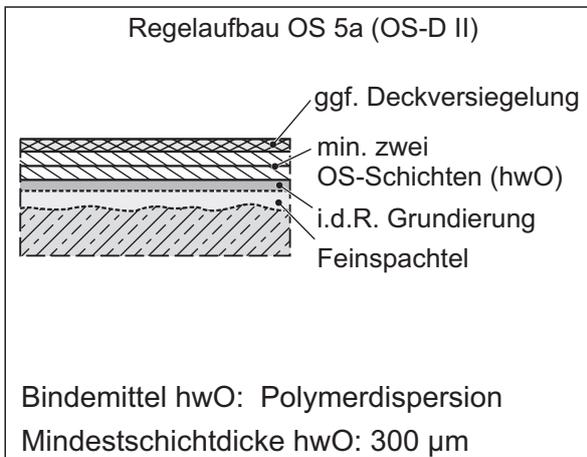


Bild 2-19: Schematischer Aufbau der klassischen Oberflächenschutzsysteme OS 5a und OS 5b

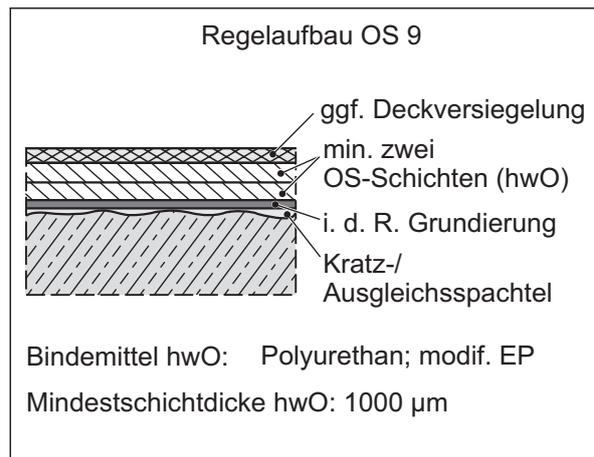
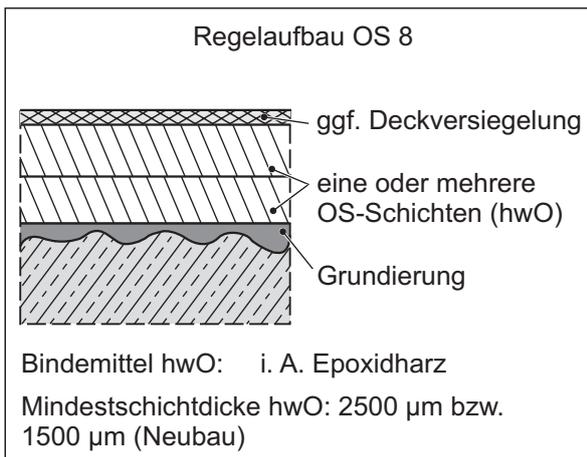


Bild 2-20: Schematischer Aufbau der klassischen Oberflächenschutzsysteme OS 8 und OS 9

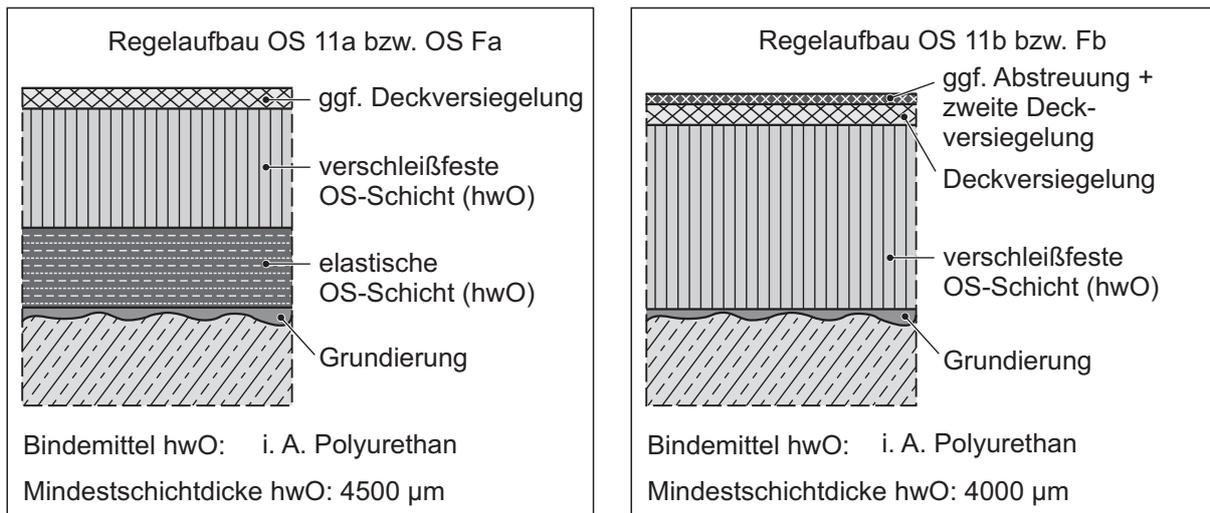


Bild 2-21: Schematischer Aufbau der klassischen Oberflächenschutzsysteme OS 11a und OS 11b

Die so genannten OS 1-Systeme sind immer Hydrophobierungen, die auf dem Grundstoff Chlorsilan basieren. Da diese Systeme rückstandsfrei in den Beton eindringen sollen, sind Mindestschichtdicken nicht relevant. Stattdessen ist die Eindringtiefe eine Größe für die langfristige Funktionstüchtigkeit.

In den OS 2-, OS 4- und OS 5-Systemen werden als hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht (hwO) i. d. R. Polymerdispersionen eingesetzt. Durch die zunehmende Schichtdicke und den komplexeren Aufbau werden die Systeme mit steigender Nummerierung belastbarer/leistungsfähiger. Es handelt sich jedoch immer um nicht begehbare und befahrbare Flächen. Fiebrich /Fie99/ zeigt anhand von Bauwerksuntersuchungen, dass die Wirksamkeit von OS 2-Systemen durch das vorherige Aufbringen einer Hydrophobierung erhöht wird. Demnach verhindert die Hydrophobierung eine „Feuchtehinterwanderung“ und ein Ablösen der Beschichtung in den Rissbereichen. Das OS 9 ist ebenfalls nicht begehbare und befahrbar; jedoch wird mit diesem System durch den Einsatz reaktiver, vergleichsweise elastischer Bindemittel (Polyurethan) in der hwO eine hohe Rissüberbrückungsfähigkeit erreicht.

Die Systeme OS 8, OS 11 und OS 13 sind hingegen begehbare und befahrbar. Hinsichtlich mechanischer und chemischer Belastungen, ist das OS 8-System am widerstandsfähigsten. Allerdings weist das OS 8-System keine Rissüberbrückungsfähigkeit auf. Die größte Rissüberbrückungsfähigkeit weist das OS 11-System auf (vergleichbar mit OS 9). Das OS 13-System liegt hinsichtlich Rissüberbrückungsfähigkeit und mechanischer sowie chemischer Belastbarkeit zwischen den drei Systemen. Die drei Systeme weisen jeweils Reaktionsharze als Bindemittel der hwO auf.

Die OS 7- und OS 10-Systeme sind entsprechend der Darstellung in der RL-SIB keine eigenständigen Oberflächenschutzsysteme, sondern sie dienen als Abdichtung unter Gussasphalt (Abschnitt 2.6). Beim OS 10 kann anstelle des Gussasphaltes in bestimmten Fällen eine verschleißfeste, vorgefüllte, ggf. abgestreute Deckschicht mit ggf. Deckversiegelung aufgebracht werden. Das OS 7 stellt in Kombination mit einer Bitumenschweißbahn, Gussasphalt und einer Deckschicht aus Gussasphalt, Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton eine Variante der Brückenabdichtung dar. In der zweiten Variante wird auf dem OS 7 eine zweilagige Bitumendichtungsbahn aufgebracht. Darauf folgt Asphaltbeton und eine Deckschicht aus Gussasphalt, Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton. Bei der dritten Variante wird das OS 10 mit nachfolgendem Gussasphalt und einer Deckschicht aus Gussasphalt, Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton eingesetzt.

Mit diesen 10 OS-Systemen kann der Großteil an Oberflächenschutzmaßnahmen an Betonbauwerken abgedeckt werden. Aber es gibt zahlreiche Sonderfälle wie Abwasseranlagen, Kühltürme, Trink-

wasserbehälter, Industrieböden und Wasserbauwerke die gesonderte Lösungen benötigen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich Materialien und Verfahren. Zwei entwickelte Sonderlösungen werden im Kapitel 7 behandelt.

Tab. 2-5: Systembezeichnung, Kurzbeschreibung und Anwendungsbereiche der zehn Oberflächenschutzsysteme nach RL-SIB

System	Kurzbeschreibung	Anwendungsbereich
OS 1	Hydrophobierung	Bedingter Feuchteschutz bei vertikalen und geneigten freibewitterten Betonbauteilen z. B. Brückenkappen, Stützwände. Nicht wirksam bei drückendem Wasser.
OS 2	Beschichtung für nicht begeh- und befahrbare Flächen (ohne Kratz- bzw. Ausgleichsspachtelung)	Vorbeugender Schutz von freibewitterten Betonbauteilen mit ausreichendem Wasserabfluss auch im Sprühbereich von Auftausalzen.
OS 4	Beschichtung mit erhöhter Dichtheit für nicht begeh- und befahrbare Flächen (mit Kratz- bzw. Ausgleichsspachtelung)	Freibewitterte Betonbauteile auch im Sprühbereich von Auftausalzen. Regelmaßnahme bei Instandsetzungen nach den Korrosionsprinzipien W und C, wenn der Untergrund rissfrei ist.
OS 5	Beschichtung mit geringer Rissüberbrückungsfähigkeit für nicht begeh- und befahrbare Flächen (mit Kratz- bzw. Ausgleichsspachtelung)	Freibewitterte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen auch im Sprühbereich von Auftausalzen.
OS 7	Beschichtung unter Dichtungsschichten für begeh- und befahrbare Flächen	Grundierungen, Versiegelungen, Kratzspachtelungen als Teil der Abdichtung von Brücken und ähnlichen Bauwerken.
OS 8	Chemisch widerstandsfähige Beschichtung für befahrbare, mechanisch stark belastete Flächen.	Alle mechanisch und chemisch beanspruchten Betonflächen, z. B. Fahrbahnen, Industrieböden, Behälterwandungen.
OS 9	Beschichtung mit erhöhter Rissüberbrückungsfähigkeit für nicht begeh- und befahrbare Flächen (mit Kratz- bzw. Ausgleichsspachtelung)	Freibewitterte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen und/oder Trennrissen auch im Sprüh- oder Spritzbereich von Auftausalzen.
OS 10	Beschichtung als Dichtungsschicht mit hoher Rissüberbrückung unter Schutz- und Deckschichten für begeh- und befahrbare Flächen	Abdichtung von Betonbauteilen mit Trennrissen und planmäßiger mechanischer Beanspruchung, z. B. Brücken, Trog- und Tunnelsohlen u. ä. Bauwerken wie Parkdecks.
OS 11	Beschichtung mit erhöhter dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit für begeh- und befahrbare Flächen	Freibewitterte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen und/oder Trennrissen und planmäßiger mechanischer Beanspruchung auch im Sprüh- oder Spritzbereich von Auftausalzen z. B. Parkhaus-Freidecks und Brückenkappen.
OS 13	Beschichtung mit nicht dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit für begeh- und befahrbare, mechanisch belastete Flächen.	Mechanisch und chemisch beanspruchte, überdachte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen auch im Einwirkungsbereich von Auftausalzen, z. B. geschlossene Parkgaragen und Tiefgaragen.

Das Funktionieren eines OS-Systems hängt maßgebend von seiner Gesamtdicke bzw. der Dicke der hwO ab. Die in Bild 2–17 bis Bild 2–21 angegebenen systemspezifischen Mindestschichtdicken beziehen sich immer auf die getrocknete Schicht (Trockenschichtdicke).

Hinsichtlich der Schichtdicke wird zwischen Mindestschichtdicke d_{\min} , Schichtdickenzuschlag d_z , Sollschichtdicke d_s und Maximalschichtdicke d_{\max} unterschieden. Mindest- und Maximalschichtdicke der hwO werden im Rahmen der Grundprüfung von der Prüfstelle ermittelt. Die Mindestschichtdicke ergibt sich als größter Wert der Schichtdicke, die erforderlich ist, um

- Spannungen bei Temperaturwechselbeanspruchung zu ertragen,
- die entsprechende Rissüberbrückungsprüfung zu bestehen und
- den geforderten CO_2 -Diffusionswiderstand zu erreichen.

Darüber hinaus ist aber mindestens der in der Tab. 2–6 angegebene Wert für d_{\min} anzusetzen. Damit die in der Grundprüfung ermittelte Mindestschichtdicke in der Praxis auch sicher erreicht wird, ist in Abhängigkeit vom OS-System und der Untergrundrauheit (Rautiefe) ein Schichtdickenzuschlag d_z erforderlich, der ebenfalls der Tab. 2–6 zu entnehmen ist.

Tab. 2–6: Mindestschichtdicken und Schichtdickenzuschlag für die hwO, abhängig von der Rautiefe (nach RL-SIB sowie 2. Berichtigung zur RL-SIB)

Oberflächenschutzsystem		Mindestschichtdicke d_{\min}	Rautiefe R_t	Schichtdickenzuschlag d_z
		μm	mm	μm
OS 2		80	0,2	50
			0,5	70
OS 4		80	0,2	50
			0,5	70
OS 5a		300	0,2	70
			0,5	100
OS 5b		2000	0,2	250
			0,5	400
			1,0	600
OS 8		2500 ¹⁾	0,5	750
			1,0	1200
OS 9		1000	0,2	250
			0,5	400
OS 11a	Verschleißschicht	3000	0,2	300
	Elastische OS-Schicht	1500	0,5	600
			1,0	1000
OS 11b		4000	0,5	750
			1,0	1200
OS 13		2500*	0,5	750
			1,0	1200
* Gesamtschichtdicke			Zwischenwerte geradlinig interpolieren	

¹⁾ bei reinen Schutzmaßnahmen, die nicht standsicherheitsrelevant sind: 1500 μm

Die Rautiefe ist der absolute Wert der Rauheit einer Oberfläche in mm. Die Maximalschichtdicke ist die Schichtdicke, die maximal vorhanden sein darf, damit der zulässige Wasserdampfdiffusionswiderstand nicht überschritten wird. Die in der Praxis aufzubringende Schichtdicke (Trockenschichtdicke) muss zwischen der Sollsichtdicke $d_s = d_{\min} + d_z$ und der Maximalschichtdicke liegen.

2.6 BRÜCKENABDICHTUNGEN

Die Ausführung von Brückenabdichtungen auf Beton erfolgt heute i. d. R. nach den zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING /ZTV03/). Entsprechend Bild 2-22 bis Bild 2-24 sind dabei prinzipiell drei Varianten möglich. In der ersten Variante wird auf ein OS 7 eine Dichtungsschicht aus Bitumen-Schweißbahnen aufgebracht. Die zweite Variante beinhaltet eine Dichtungsschicht aus zweilagig aufgetragenen Dichtungsbahnen, die ebenfalls auf einem OS 7 appliziert werden, und die dritte Variante ist hinsichtlich der Abdichtung ein OS 10, auf das eine Schutzschicht aus Gussasphalt sowie eine Deckschicht aufgebracht wird. Der Richtwert für die Dicke der Schutzschicht beträgt 35 mm. Die Gesamtdicke der Schutz- und Deckschicht darf nach ZTV-ING, Teil 7, an keiner Stelle 60 mm unterschreiten.

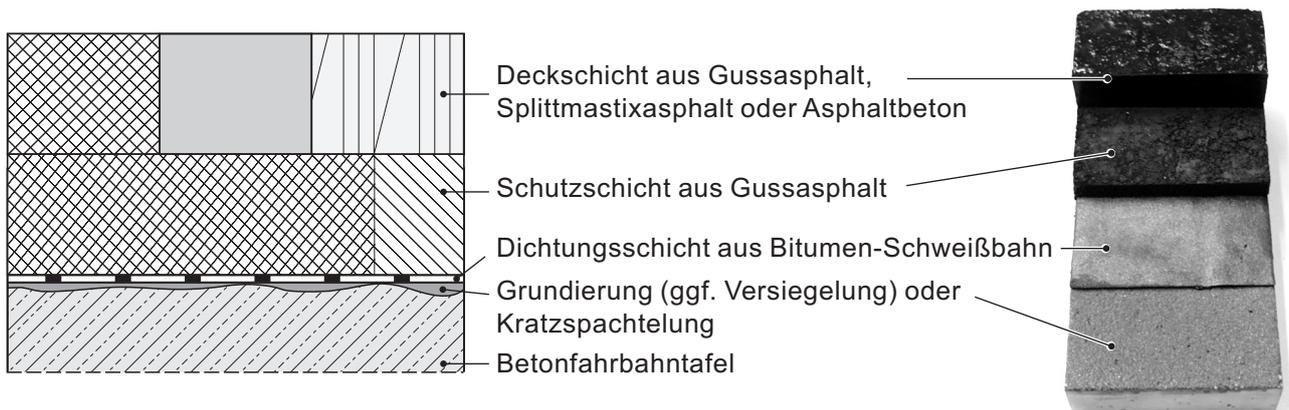


Bild 2-22: Brückenbelag auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn nach ZTV-ING, Teil 7

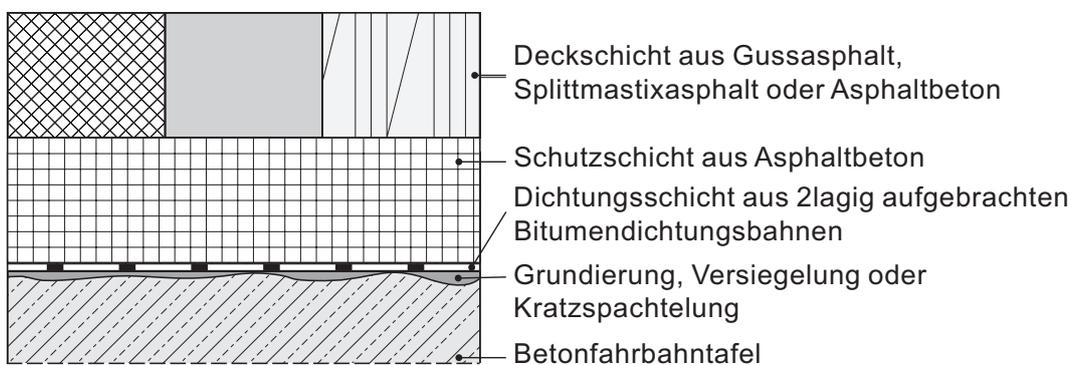


Bild 2-23: Brückenbelag auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus zweilagig aufgetragenen Bitumendichtungsbahnen nach ZTV-ING, Teil 7



Bild 2-24: Brückenbelag auf Beton mit einer Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff nach ZTV-ING, Teil 7

In Anlehnung an diese Brückenabdichtungen werden heute auch zunehmend Parkbauten abgedichtet. Dazu kann nach /DBV10/ neben einem OS 10 mit Schutzschicht auch eine Abdichtung bestehend aus Epoxidharz, Bitumen-Schweißbahn und Gussasphalt nach DIN 18195-5 aufgebracht werden.

3. SCHÄDEN AN OS-SYSTEMEN UND PRÜFMETHODEN

3.1 ALLGEMEINES

Die Schäden an Oberflächenschutzsystemen, die aus den im Abschnitt 2.2 erläuterten Einwirkungen resultieren, basieren hauptsächlich auf chemischen, mechanischen und physikalischen Schadensmechanismen sowie der Kombination dieser drei Mechanismen. Beim Bewuchs sowie den Ablagerungen treten zusätzlich biologische Mechanismen auf. Bild 3–1 ordnet die Einwirkungen den Gruppen der Schadensmechanismen zu. Die Schadensmechanismen bedingen Schäden. Diese wurden in die in Bild 3–1 dargestellten typischen Schadensausprägungen zusammengefasst. Welche Schäden zu welchen Schadensausprägungen gehören, zeigt Bild 3–2. Typische Schäden, die an Oberflächenschutzsystemen auftreten, sind in Bild 3–2 ebenfalls dargestellt.

Die Zersetzung von Beschichtungen ist langfristig mit einem Abbau der Materialschicht verbunden. Die Änderung von Farbe, Glanz und/oder Helligkeit ist ein erstes Anzeichen für Alterungsvorgänge. Farbänderungen sind häufig mit der Zersetzung von Pigmenten verbunden. Eine Vergilbung infolge Lichteinwirkung tritt hingegen bevorzugt bei aromatischen Isocyanaten und Epoxidharzen auf. Die chemisch bedingte Versprödung steht häufig am Anfang einer als Schaden erkennbaren Zersetzung. Sie wird durch die Alterung des Polymerbindemittels bedingt. Die eingeschränkte Beweglichkeit der Polymerketten bei tiefen Temperaturen, kann jedoch auch zu einer mechanisch bedingten Versprödung führen. Ablagerungen sind artfremde Substanzen (Staubimmissionen, Salze u. ä.), die sich durch mechanische Bearbeitung mit Wasser, Lösemittel, Säuren oder Laugen, entfernen lassen. Mikroorganismen (Bewuchs) können hingegen auch zerstörend auf Polymerbeschichtungen wirken /Eng01/.

Der Verschleiß und Abrieb bedingt ebenfalls eine Reduzierung der Materialschichten. Sowohl chemische als auch mechanische und physikalische Mechanismen können einen Adhäsionsverlust bedingen: So kann es infolge chemischer Prozesse zum Verseifen des Polymers in der Kontaktzone zum Beton kommen, infolge zu hoher Scherspannungen kann die Adhäsionsfestigkeit überschritten werden und infolge von Quellen/Schwinden sowie Temperaturdehnungen kann die Verbundzone ebenfalls gestört werden. Das Zusammenspiel der Mechanismen führt letztendlich häufig zum Versagen der Adhäsion. Ähnliches gilt für die Entstehung von Hohlräumen und Blasen. Mechanisch bedingte Risse resultieren aus Bewegungen im Untergrund, während Risse, die unabhängig vom Untergrund im Oberflächenschutzsystem entstehen, durch physikalische Prozesse wie Quellen, Schwinden, Temperaturdehnungen hervorgerufen werden. Die aufgrund chemischer Mechanismen entstehenden Risse werden in der Schadensausprägung Versprödung zusammengefasst.

Häufig durchlaufen Oberflächenschutzsysteme Schadensprozesse bei denen die Erscheinungsform des Schadens wechselt. So kann eine Beschichtung zunächst Glanz verlieren, dann netzartige Risse bekommen und im Weiteren kreiden.

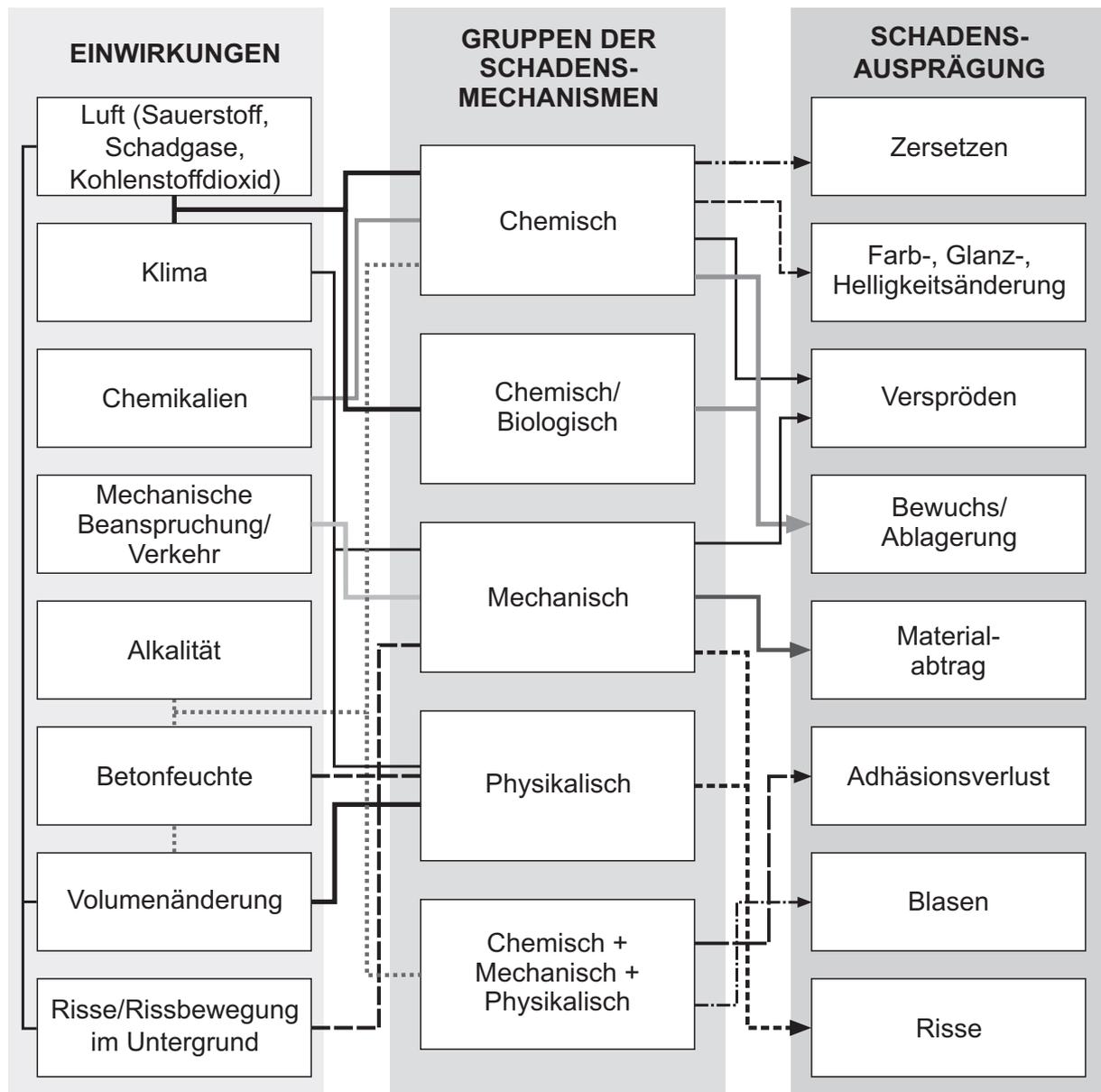


Bild 3-1: Durch äußere Einwirkungen hervorgerufene Schadensmechanismen und die daraus resultierenden typischen Schadensausprägungen

Die dargestellten Schäden sind aufgrund der jeweiligen Funktionen der Oberflächenschutzsysteme nicht immer unmittelbar vermeidbar. So wird beispielsweise ein OS 2 an einer Betonfassade immer der Bewitterung sowie der Betonalkalität und –feuchte ausgesetzt. Genauso werden OS 11-Systeme befahren und mit der Zeit tritt Verschleiß ein. Hier kann nur eine Material- bzw. Systemweiterentwicklung Schäden reduzieren/vermeiden. Im Abschnitt 3.2 werden die Schadensmechanismen weitergehend erläutert. Dazu erfolgen eine weitergehende allgemeine Aufschlüsselung der Mechanismen und deren Bewertung in Bezug auf die jeweiligen Bindemittel. In den Kapitel 5 und 6 werden dann konkret Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an ausgewählten Oberflächenschutzsystemen dargestellt.

Aber neben diesen Schäden gibt es auch vermeidbare Schäden. So kann z. B. durch die Sicherstellung ausreichender Betonoberflächenzugfestigkeiten und geeigneter Betonfeuchten eine gute Adhäsion zum Untergrund gewöhnlich gewährleistet werden. Mit welchen Maßnahmen derartige Schäden vermieden werden können ist Inhalt des Abschnitts 3.3.

Sind die Einflussgrößen bekannt, müssen diese zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen abgebildet werden. Weiterhin sind Methoden zur Prüfung der Oberflächenschutzsysteme nach bzw. während der Variation der Einflussgrößen erforderlich. Dies ist Inhalt des Abschnitts 3.4.

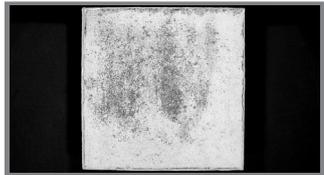
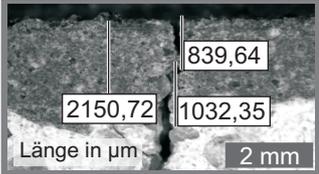
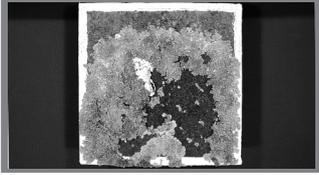
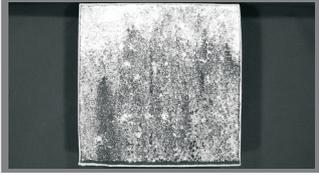
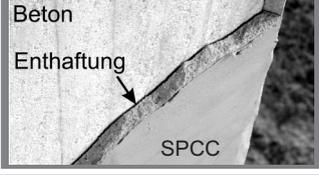
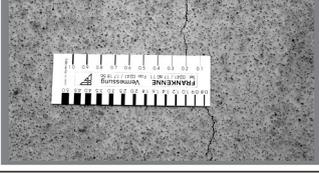
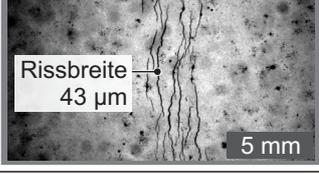
Schadensausprägung	Schadensformen	Beispiele	
Zersetzen	Kreiden, Auflösen, Aufweichen		
Farb-, Glanz-, Helligkeitsänderung	Vergilben, Verfärben, Verblässen, Glanzzu- oder -abnahme		
Verspröden	Netzartige Risse, Abnahme der Rissüberbrückungsfähigkeit		
Bewuchs/ Ablagerung	Schmutzablagerung, Schmutzfahnen, Ausblühung, Algen, Pilze		
Materialabtrag	Abtrag von OS-Schichten		
Adhäsionsverlust	Aufschüsseln, Abschuppen, Ablättern, Unterwandern, Hohllagen		
Blasen	Einzelne große Blasen, großflächige Pusteln (kleine Blasen), Schaumstruktur		
Risse	Trennriss, Anriss, netzartige Risse		

Bild 3-2: Schadensformen in den typischen Schadensausprägungen mit Beispielen

3.2 SCHADENSMECHANISMEN

3.2.1 CHEMISCH

POLYMERBASIERTE OS-SYSTEME

Chemische Schädigungsmechanismen greifen die kovalenten Bindungen der Polymerketten an. Hierdurch kann es zu einer Spaltung der Ketten oder zu einer Vernetzung mehrerer Ketten untereinander. In jedem Fall sind es irreversible Schäden /Ehr07/.

Die einzelnen Mechanismen der chemischen Polymerschädigung sind in Tab. 3-1 aufgeführt. Detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Wechselwirkungen sowie eine quantitative Beschreibung der Auswirkungen für bestimmte Polymere kann /Dol78/, /Ehr07/ entnommen werden. Aufgrund der Vielzahl an Komponenten in den Materialien für Oberflächenschutzsysteme (Füllstoffe, Pigmente, Zusatzstoffe) sowie der Überlagerung der Einwirkungen ist die Auswirkung einzelner Schadensmechanismen auf die hier relevanten Materialien nicht quantifizierbar.

Tab. 3-1: Chemische Schädigungsmechanismen bei Polymeren

Einwirkung	Mechanismus	Auswirkung	Messgrößen	Schadensausprägung
UV-Strahlung	Photokatalytische Spaltung	Vernetzung, Kettenspaltung	Molmasse, Steifigkeit, Festigkeit, Dehnung, Optik	Farb-, Glanz-, Helligkeitsänderung, Versprödung, Zersetzung
Zzgl. Schadgas	Beschleunigung d. photokatalytischen Spaltung			
Temperatur (>> Gebrauchstemperatur)	Spaltung kovalenter Bindungen	Kettenspaltung	Molmasse bzw. Gewicht, Festigkeit, Dehnung	Farb-, Glanz-, Helligkeitsänderung, Zersetzung
Sauerstoff + Strahlung oder Wärme	Oxidation	Kettenfortpflanzung, Kettenverzweigung	OIT*, Steifigkeit, Dehnung	Versprödung
Ozon ggf. + Strahlung	Im Vergleich schnellere Oxidation			
Wasser	Hydrolyse	Kettenspaltung	Molmasse, Festigkeit, Dehnung	Zersetzung
Chemikalien	Chemische Wechselwirkung	Kettenspaltung, Vernetzung	Molmasse, Festigkeit, Steifigkeit, Dehnung	Farb-, Glanzänderung, Versprödung, Zersetzung

* OIT: Oxidative Induction Time mittels Differentialkalorimetrie (DSC)

Basierend auf dem Lambert-Beersche Gesetz über die Abminderung der Strahlungsintensität mit der Weglänge beim Durchgang durch eine absorbierende Substanz und dem Zusammenhang der Intensitätsschwächung mit der Konzentration der absorbierenden Substanz ist die Eindringtiefe der Globalstrahlung in eine Beschichtung auf wenige nm begrenzt. Somit wirken UV- und Globalstrahlung vor allem an der Beschichtungsoberfläche ein. Infolge Wärmeleitung kann die Temperatur hingegen Vorgänge im kompletten OS-System beeinflussen. Mit Temperaturen weit oberhalb der Gebrauchstemperaturen von OS-Systemen kann soviel Energie in das Material eingebracht werden, dass kovalente Bindungen der Polymerketten gespalten werden. Von wesentlich größerer Bedeutung ist jedoch die Beschleunigung bzw. Verlangsamung anderer chemischer Prozesse infolge der Temperatur. Zur

Beschreibung des Temperatureinflusses auf eine chemische Einzelreaktion wird häufig der Arrhenius-Ansatz verwendet. Dieser Ansatz ist jedoch nicht ohne weiteres auf gekoppelte chemische Reaktionen übertragbar.

Viele der in Tab. 3–1 aufgeführten Reaktionen sind an die Diffusion der Reaktionspartner in das Material gebunden. So beginnen auch oxidative Vorgänge immer an der Oberfläche. Die Eindringtiefe von Sauerstoff und Ozon in das Material hängt vom Diffusionswiderstand der Beschichtung ab. Entsprechend verhält es sich mit der Hydrolyse sowie den chemischen Reaktionen infolge Chemikalieneinwirkung.

Die Alkalien der Betonporenlösung können bei Polymeren ein Verseifen (alkalische Hydrolyse) bedingen. Ist die Betonrandzone zum Zeitpunkt der Beschichtung nicht karbonatisiert, sind Polymere zu verwenden die nicht bzw. nur vernachlässigbar durch Alkalien angegriffen werden.

Die Beständigkeit der für OS-Systeme verwendeten Materialien gegenüber den in Tab. 3–1 erläuterten chemischen Schädigungsmechanismen ist in erster Linie von der Materialzusammensetzung abhängig. Somit sind allgemeingültige Aussagen nicht möglich. In Tab. 3–2 wird versucht eine Relation zwischen den relevanten Materialien und den chemischen Schädigungsmechanismen herzustellen.

Tab. 3–2: Bedeutung der chemischen Schädigungsmechanismen für die Materialien der OS-Systeme

	Photokatalytische Spaltung	Hydrolyse	Alkalische Lösung	Säuren
Epoxidharze	Aliphatische Amine widerstandsfähiger als aromatische Amine. Tritt im oberen Bereich von Kühlturmwänden auf: Kreiden, Risse /Eng06/	Keine weitergehenden Angaben verfügbar		Diffundieren ein, Reaktionen mit Harz
Polyurethane	Aliphatische Isocyanate widerstandsfähiger als aromatische Isocyanate. Aromatische Isocyanate: Vergilbung, Abnahme Dehnung /Sto87/ Nach /Eng06/ gibt es PUR-Beschichtungen die beständiger als EP-Beschichtungen sind.	Aliphatische Isocyanate widerstandsfähiger als aromatische Isocyanate /Mar96/.	O-C-N Gruppe, ähnlich wie Polyamide anfällig für Alkalien und Säuren die hydrolytische Spaltungen hervorrufen	
Polymerdispersionen	PVK* und Füllstoffart relevant. Acrylat/Styrole: Vergilbung, Kreiden bei PVK ~< 35% /Kit05/	Acrylate-, besonders Acrylat/Styrolidispersionen haben gute Hydrolysestabilität /Kit05/		Kein Einsatzgebiet
Siliziumorganische Verbindungen	-	-	Von Verbindung abhängig	Kein Einsatzgebiet
Zementgebundene Systeme	-	-	Nur bei hohen Konzentrationen (>10%): lösend	pH<3,5: Zersetzung
Glas	-	-	Auflösung SiO ₂ -Netzwerk	Auslaugung Alkaliionen

* PVK: Pigment-Volumen-Konzentration: Volumen Füllstoffe und Pigmente zu Volumen Füllstoffe, Pigmente und Polymer

Generell sind Epoxidharze und Polyurethane gegenüber den aufgeführten Mechanismen sehr beständig. In der Tab. 3–2 werden nur Besonderheiten genannt. Da siliziumorganische Verbindungen in den

Untergrund eindringen, können maximal die ersten nm des hydrophobierten Betons Veränderungen durch photokatalytische Spaltungen erfahren. Hierzu existieren noch keine eindeutigen Aussagen.

ZEMENTGEBUNDENE OBERFLÄCHENSCHUTZSCHICHTEN

Der schädigende chemische Angriff auf zementgebundene Materialien kann sowohl von Außen z. B. durch Säuren als auch von Innen durch die Ausgangsstoffe des Betons verursacht werden. Entsprechend ihres äußeren Erscheinungsbilds und ihren Auswirkungen können zwei Arten der Schädigung unterschieden werden:

- Lösend: Neubildung löslicher Reaktionsprodukte an der Oberfläche (z. B. Säureangriff) und
- Treibend: Bildung schwerlöslicher voluminöser Reaktionsprodukte im Betoninneren (z. B. Sulfatangriff).

Im Wesentlichen unterliegt der Zementstein des Betons den Angriffen. Weiterführendes hierzu kann */Rau08a/* entnommen werden. Ein probabilistisches Konzept zur Beurteilung der Korrosion zementgebundener Baustoffe durch lösenden und treibenden Angriff wurde von Rigo */Rig05/*, */Rig09/* erarbeitet. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1122 „Vorhersage des zeitlichen Verlaufs von physikalischen-chemischen Schädigungsprozessen an mineralischen Werkstoffen“ wurden auf den jeweiligen Mechanismen basierende Modelle für den Wasser- und Salzhaushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe */Ruc06/* sowie für den Säureangriff */Bed09/* und Sulfatangriff */Fen10/* auf Beton erarbeitet.

Eine spezielle Form des Säureangriffs auf zementgebundene Systeme stellt die biogene Schwefelsäurekorrosion in Abwasseranlagen dar */Orl10a/*. Vereinfacht lässt sich der Mechanismus des Sulfatumsatzes und der biogenen Schwefelsäurekorrosion folgendermaßen beschreiben */DWA10/*:

- Mikrobielle Reduktion von Sulfat und anderen Schwefelkomponenten im Abwasser unter anaeroben Bedingungen zu Sulfiden (H_2S , HS^- und S^{2-}).
- Freisetzung von Schwefelwasserstoffgas in die Kanalatmosphäre, das sich an der feuchten Kanalwand löst.
- Mikrobielle Oxidation des auf Baustoffen oberhalb des Abwasserspiegels gelösten H_2S zu elementarem Schwefel und Schwefelsäure.

Ein Teil der möglicherweise im Abwasser vorhandenen Sulfide wird in ungelöster Form (gebunden an Metallen) vorliegen. So ist beispielsweise die schwarze Farbe von angefaultem Abwasser auf feinverteiltes Eisensulfid zurückzuführen. Die ungelösten Sulfide können bei normalen Abwasserhältnissen nicht zur Entstehung von Schwefelwasserstoff beitragen. Wird in Abwasserproben der Gesamtsulfidgehalt ermittelt ist ein Abzug der ungelösten Sulfide notwendig. Bei einem weitgehend angefaulten häuslichen Abwasser kann man den Gehalt an ungelösten Sulfiden mit etwa 50 % des Gesamtsulfidgehaltes ansetzen */DWA10/*. Von den gelösten Sulfiden liegt wiederum nur ein Teil als Schwefelwasserstoff vor, dieser kann gasförmig entweichen und zu Korrosion führen. Der Anteil der als Schwefelwasserstoff vorliegenden gelösten Sulfide ist abhängig vom pH-Wert und vorliegenden Turbulenzen.

Der Stoffumsatz bei biogener Schwefelsäurekorrosion in Abwasserkanälen ist in Bild 3–3 dargestellt. Die linke Hälfte zeigt die Verhältnisse bei überwiegend aerobem Abwasser. Sulfate, Nährsalze, Sauerstoff und organisches Substrat diffundieren aus dem Abwasser in die Sielhaut und Ablagerungen. Hier erfolgt die mikrobielle Reduktion von Sulfat und Eiweißverbindungen. Ist der gelöste Sauerstoff aufgezehrt, beginnt die Reduktion des Sulfates zu Sulfid durch die anaeroben Desulfurikanten. Das Sulfid diffundiert Richtung Abwasser, wobei es in der aeroben Schicht wieder zu Sulfat oxidiert wird.

Unter aeroben Bedingungen kommt es demnach zwar in der Tiefe der Sielhaut und der Ablagerungen zu einer Sulfatreduktion, die reduzierten Schwefelverbindungen werden allerdings vor dem Erreichen des Abwassers wieder oxidiert /DWA10/.

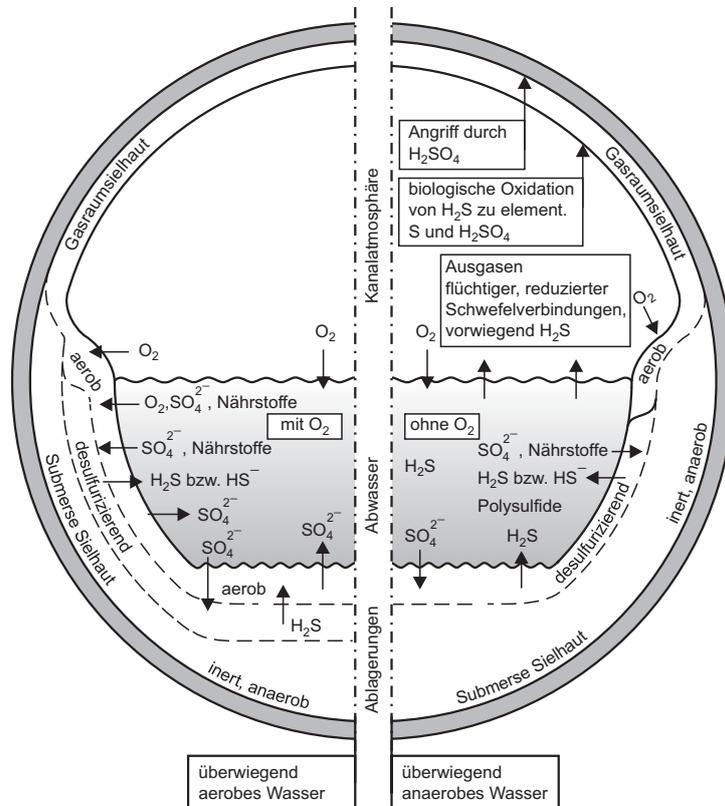


Bild 3-3: Stoffumsatz in Abwasserkanälen bei biogener Schwefelsäurekorrosion /DWA10/

Unter anoxischen oder anaeroben Abwasserbedingungen erfolgt bereits in den oberen Schichten von Sielhaut und Ablagerungen die Reduktion von Sulfat. Die entstehenden Sulfide diffundieren ungehindert in das Abwasser. Hier stellt sich in Abhängigkeit vom pH-Wert des Abwassers ein Gleichgewicht zwischen H_2S und HS^- ein. Je niedriger der pH-Wert des Abwassers, umso größer der Anteil des H_2S am Gesamt-Sulfid und umso größer das H_2S -Potenzial, das in die Kanalatmosphäre freigesetzt werden kann und neben Korrosion zu Geruchsproblemen und Lebensgefährdung führen kann /DWA10/. Diffusion und Turbulenz bedingen die Freisetzung des Schwefelwasserstoffes in der Kanalatmosphäre und die anschließende Lösung an der feuchten Kanalwand. Im Weiteren oxidieren säuretolerante Thiobacillen in der Gasraumsielhaut das Schwefelwasserstoff zu Schwefelsäure. Besonders in warmen und abflussschwachen Jahreszeiten kommt es zu einer Anreicherung der biogen gebildeten Schwefelsäure, vorwiegend in den Rohrscheiteln /DWA10/, /Loh08/. Diese Vorgänge werden maßgeblich durch die Temperatur beeinflusst. Bereits bei $+18\text{ }^\circ\text{C}$ kann eine 6prozentige Schwefelsäure mit $\text{pH} = 0,1$ gebildet werden.

Schwefelsäure bedingt zunächst einen lösenden Angriff auf den Zementstein des Betons. Hierbei dissoziiert Schwefelsäure in Wasser zu Säureionen und Sulfationen. Der Säureanteil greift das Calciumhydroxidgefüge an. Nachfolgend dringen Sulfationen in den Beton ein und bewirken dort einen treibenden Angriff. Bis zu einem pH Wert von etwa 3,5 wird Beton mit hohem Widerstand gegen chemische Angriffe nur geringfügig geschädigt. Bei den beschriebenen Zuständen mit pH Werten unterhalb von 1 kann der Beton jedoch innerhalb weniger Jahre im Zentimeter-Bereich abgetragen werden. Bild 3-4, links, vermitteln einen Eindruck über den möglichen Bindemittelverlust von Beton;

die Gesteinskörnung ragt bei dem Bohrkern etwa 20 mm heraus. Der Bohrkern wurde einem Abwasserkanal aus Stahlbeton nach einer sechsjährigen Nutzungsdauer entnommen. Bild 3–4, rechts, zeigt einen Dünnschliff des links dargestellten Bohrkerns. Die freigelegte Gesteinskörnung ist ebenso wie das durch den lösenden und treibenden Angriff zerstörte Bindemittelgefüge zu erkennen. Der Übergang in ein augenscheinlich intaktes Bindemittelgefüge erfolgt nach etwa 5 mm.

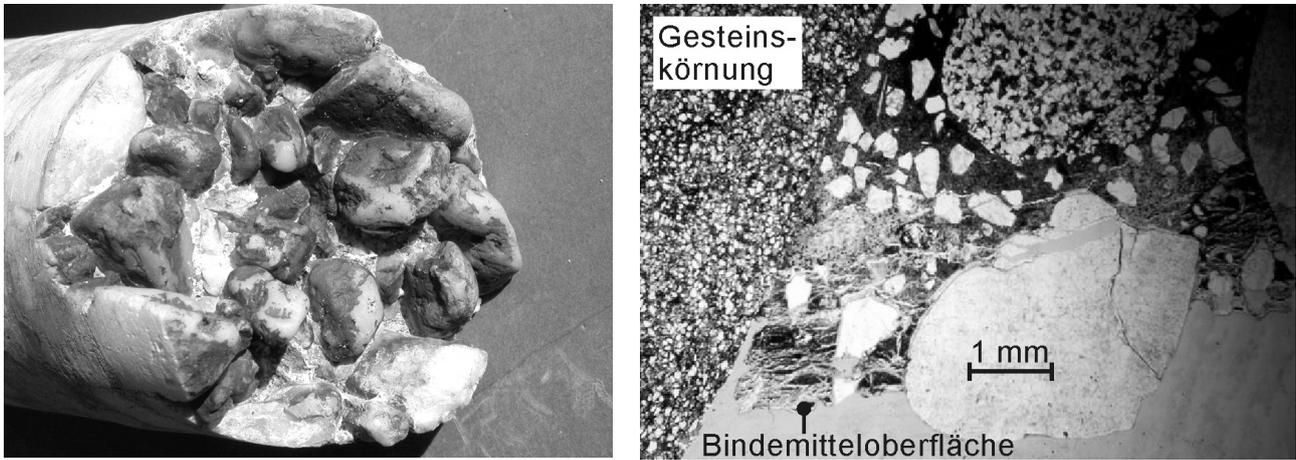


Bild 3–4: Links: Geschädigte Betonoberfläche eines Abwasserkanals. Rechts: Geschädigtes Bindemittel infolge biogenen Schwefelsäureangriffs (Mikroskopaufnahme eines Dünnschliffs).

GLAS

Die Glaskorrosion wird in zahlreichen, sich ergänzenden und teilweise widersprechenden Hypothesen und Modellvorstellungen behandelt /Dor79/, /Hol64/, /New85/. Im Rahmen dieser Arbeit sollen lediglich die grundlegenden Korrosionsmechanismen von Glas kurz zusammengefasst werden.

Zwei grundlegende Korrosionsmechanismen lassen sich unterscheiden /Scho88/:

- Auflösung in alkalischen Lösungen ($\text{pH} > 9$): Das SiO_2 -Netzwerk des Glases wird durch ein Hydroxidion (OH^-) angegriffen. Durch Folgereaktionen mit H_2O entsteht erneut ein Hydroxidion, womit sich die erste Reaktion wiederholen kann. Dieser Vorgang nimmt mit steigendem pH-Wert zu. Die Zugfestigkeit des Glases wird aufgrund der Auflösung von Si-O-Si-Bindungen reduziert.
- Auslaugung in neutralen und sauren Lösungen: Bewegliche Alkaliionen des Glases werden gegen Protonen (H^+) und Hydronium-Ionen (H_3O^+) der Lösung ausgetauscht. Diese Auslaugung führt zur Bildung einer Oberflächenschicht mit niedrigem Alkaligehalt, die im fortgeschrittenen Stadium auch als Gelschicht bezeichnet wird. Man nimmt einen diffusionsgesteuerten Vorgang an.

In realen Systemen kommt es zur Überlagerung der beiden genannten Mechanismen. Bei niedrigen Temperaturen und niedrigerem pH-Wert überwiegt die Auslaugung. Mit der Zeit sinkt die Geschwindigkeit, mit der die Dicke der ausgelaugten Schicht zunimmt. Dann wird die Auflösung des Netzwerkes geschwindigkeitsbestimmend, denn durch den Ionenaustausch steigt der pH-Wert der Lösung an, so dass die Hydrolyse des Netzwerkes beschleunigt wird.

Über die Zusammensetzung der Gläser kann der Widerstand des Materials gegenüber diesen Schädigungsmechanismen jedoch beeinflusst werden. So sind Borosilikatgläser im Vergleich zu Kalk-Natron-Gläser deutlich chemikalien- und temperaturbeständiger.

3.2.2 CHEMISCH/BIOLOGISCH

Mikroorganismen, vor allem Schimmelpilze sind die häufigste Ursache der biologischen Schädigung von Polymeren. Stoffwechselprodukte, vor allem die durch Schimmel oder Bakterien erzeugten Enzyme, können entweder das polymere Material selbst oder dessen Zusatzstoffe chemisch angreifen, was sich in einer oberflächlichen Zerstörung, in Glanzverlust sowie in der Veränderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften äußert /Dol78/.

Der Befall durch Mikroorganismen kann durch gute Belüftung und niedrige Luftfeuchten verhindert werden. Die Polymere der Beschichtungen, insbesondere Polyurethane, sind häufig mit bioziden Zusätzen ausgestattet. Epoxidharze gelten gegenüber biologischer Schädigung durch Mikroorganismen und Insekten etc. als beständig.

3.2.3 PHYSIKALISCH

POLYMERBASIERTE OS-SYSTEME

Bei der physikalischen Alterung werden nicht die kovalenten Bindungen innerhalb der Polymerketten angegriffen sondern lediglich die zwischenmolekularen Bindungen in ihrer Stärke beeinflusst. Dies kann durch die Einwirkung von Wärme, durch den Kontakt mit Wasser oder durch den Einfluss eines anderen Mediums hervorgerufen werden (Tab. 3–3).

Tab. 3–3: Physikalische Schädigungsmechanismen bei Polymeren

Einwirkung	Mechanismus	Auswirkung	Messgrößen	Schadensausprägung
Temperatur	Wärmeeintrag	Molekülbeweglichkeit, Ausdehnung, plastisches Verformen unter Last	Steifigkeit, Festigkeit, Dimension	Adhäsionsverlust, Blasen, Risse, Versprödung
Wasser, weitere Medien	Quellen, Lösen	Geringere Nebervalenzkräfte	Gewicht, Dimension, Härte, Festigkeit, Steifigkeit, Dehnung	
	Geringere Oberflächenspannung	Spannungsrisbildung	Zeitstandfestigkeit	
Feuchte-Wechsel	Quellen/Schwinden	Eigenspannungen	Visuell, Steifigkeit, Dehnung	Risse, Versprödung

Mit steigender Temperatur steigt die Molekülbeweglichkeit, mit sinkender Temperatur fällt sie. In beiden Fällen verändert es die mechanischen Eigenschaften. Zusätzlich bedingt die Temperaturänderung eine Dimensionsänderung, woraus insbesondere bei Temperaturwechseln innere Spannungen resultieren können, die wiederum weitere Alterungsprozesse beeinflussen. Der Eintrag von Wärme beschleunigt zudem Diffusionsprozesse. Stabilisatoren und/oder Weichmacher können sich mit zunehmender Wärme schneller verflüchtigen. Somit bedingt ein Anstieg der Temperatur aus mehreren Gründen die Beschleunigung weiterer Alterungsprozesse.

Durch den Kontakt mit Wasser werden, neben der bereits beschriebenen Hydrolyse, auch durch physikalische Wechselwirkungen die mechanischen Eigenschaften der Polymere verändert. Es kommt im Allgemeinen zunächst zu einer Weichmachung des Polymers. Dies bedingt eine Zunahme der Dehnungen bei sinkender Festigkeit und Steifigkeit. Absorbiertes Wasser kann jedoch auch die Auslaugung von Weichmachern, Stabilisatoren sowie weiterer Zusatzstoffe bewirken. Dies kann wie-

derum zu einem Anstieg der Steifigkeit sowie einer Versprödung führen.

Der häufige Wechsel der Umgebungsfeuchtigkeit, z. B. in der Freibewitterung, bedingt eine weitere Beanspruchung des Polymers. Durch die Feuchtigkeitsaufnahme und Austrocknung entstehen innere Spannungen die Materialermüdung und Rissbildung bedingen können. Die Größenordnung der Materialbeanspruchung wird vor allem durch die Adsorption und Absorption des Mediums durch das Polymer bestimmt. Bild 3–6 fasst die Schädigungsvorgänge bei Polymeren in Medien nochmals zusammen.

Die beschriebenen Prozesse beim Kontakt mit Wasser können direkt auf den Einfluss anderer Medien übertragen werden. Das Maß der physikalischen Medienalterung wird wesentlich von der Kohäsionsenergiedichte (Löslichkeitsparameter) ausgedrückt. Je ähnlicher der Löslichkeitsparameter des Polymers und des einwirkenden Mediums desto größer werden die Auswirkungen der Mechanismen /Rog82/.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am ibac wurden 10 unterschiedliche handelsübliche Epoxidharzgrundierungen hinsichtlich ihres Verhaltens in Porenlösung charakterisiert. Dazu wurden die maximalen Massenzunahmen und die Spannungs-Dehnungslinien der freien Filme nach Lagerung bei 23 °C / 50 % relativer Luftfeuchte sowie Lagerung in Porenlösung (17 mmol/l Natrium, 170 mmol/l Kalium, gesättigt mit Calciumhydroxid, pH Wert 13,8) bei 23 °C bestimmt. Die freien Filme wurden als Knochenproben mit einer Länge von 16 cm, einer Breite im verjüngten Bereich von 1 cm und einer Dicke von 4 mm bei 23 °C / 50 % relativer Luftfeuchte hergestellt. Nach 7tägiger Wartezeit im gleichen Klima begann die Lagerung. Nach Erreichen der Massenkonstanz wurden Zugversuche mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Tab. 3–4 zeigt die Ergebnisse der maximalen Massenzunahme. Die Lagerungsdauer betrug rund 3 Monate. Bei der Grundierung G8 handelt es sich um ein wasserbasiertes Epoxidharz.

Tab. 3–4: Massenänderung nach Lagerung in Luft oder Porenlösung (jeweils Mittelwert aus 3 Einzelwerten)

Lagerung	Grundierung									
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%	ΔM.-%
Luft	0,46	0,15	0,30	0,58	0,50	0,59	0,34	-0,32	0,35	0,26
Porenlösung	2,43	1,14	1,35	2,51	1,58	2,15	2,36	29,48	2,08	1,42

Anhand Bild 3–5 ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeiten einiger Grundierungen um über 50 % abnehmen, während andere keine messbare Veränderung der Zugfestigkeiten erfahren. Die deutlichen Abnahmen der Zugfestigkeiten sind mit einer Zunahme der Dehnungen verbunden.

Betrachtet man Epoxidharze, Polyurethane und Polymerdispersionen die für Beschichtungen verwendet werden, so nehmen die Dispersionen mit 6 bis 9 M.-% wesentlich mehr Wasser auf als Epoxidharze und Polyurethane mit etwa 1 bis 3 M.-%. Eine Ausnahme stellen dabei die wasserbasierten Epoxidharze dar.

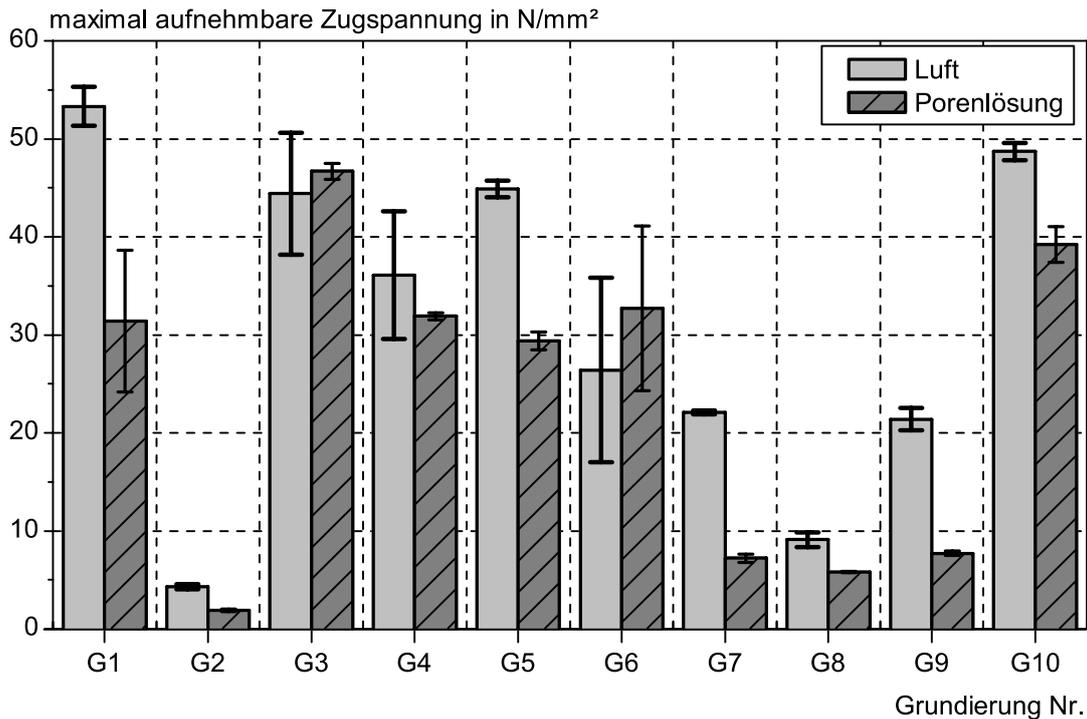


Bild 3-5: Zugfestigkeit der im Laborklima und in Porenlösung gelagerten Zugproben, Mittelwert und Standardabweichung

ZEMENTGEBUNDENE OBERFLÄCHENSCHUTZSCHICHTEN

Infolge Temperatur- und Feuchtewechsel erfahren zementgebundene Schichten ebenfalls Dehnungsänderungen (Quellen, Schwinden, Temperaturdehnung). Die Mechanismen sind in /Wes93/ beschrieben.

Am häufigsten treten jedoch Schäden infolge Fröhschwinden auf. Fröhschwinden resultiert aus dem Verdunsten des Überschusswassers und Austrocknung in den ersten Tagen. Der Zementstein zieht sich infolge dessen zusammen. Da das Material zu diesem Zeitpunkt noch plastisch und somit leicht verformbar ist, kann das Fröhschwinden um ein vielfaches größer sein als das Trocknungsschwinden. Bei Oberflächenschutzschichten wird diese Verformung durch den Betonuntergrund behindert, wodurch netzartige Risse entstehen. Da die Gesteinskörnung im Allgemeinen nicht schwindet, hängt die absolute Größe des Schwindens sowie die zeitliche Entwicklung maßgeblich vom Volumen und der Zusammensetzung des Zementleims ab.

3.2.4 MECHANISCH

Die mechanische Schädigung von OS-Systemen resultiert im Wesentlichen aus Reibung und dynamischer Last. Bei Industriefußböden kommen noch statische Lasten hinzu. Tab. 3-5 gibt eine Übersicht über die mechanischen Schädigungsmechanismen.

Der Widerstand von OS-Systemen gegenüber Reibung und dynamischer Belastung hängt vom Bindemittel, den Füllstoffen (Art und Menge) sowie der Schichtdicke des Materials ab. Für beide Einwirkungen gilt, je höher die Schichtdicke, desto mehr Widerstand gegenüber der Beanspruchung. Während zur schadefreien Aufnahme dynamischer Lasten eher dehnfähigere Materialien benötigt werden,

wird der Reibung mit steiferen Materialien ein größerer Widerstand entgegengesetzt. Weiterhin wird der Abrieb durch Füllstoffe wie Korund und Quarz reduziert.

Tab. 3–5: Mechanische Schädigungsmechanismen

Einwirkung	Mechanismus	Auswirkung	Messgrößen	Schadensausprägung
Statische Last	Kriechen, Relaxation	Dehnungszunahme, Spannungsabnahme	Kriechdehnung, Standzeit, Spannungsrelaxation	Risse, Adhäsionsverlust
Dynamische Last	Ermüdung	Temperaturerhöhung, Risse	Dyn. Rissüberbrückung, Restfestigkeit, Visuell	
Reibung	Verschleiß	Abrieb	Schichtdicke, Oberflächenrauigkeit	Materialabtrag
Schubkräfte	Überschreiten der Scherfestigkeit	Lokale Verbundstörungen	Haftzugfestigkeit	Adhäsionsverlust
Stoß-, Schlagkräfte	Überschreiten der Festigkeiten	Lokale Materialzerstörung	Ausdehnung des zerstörten Bereiches	Materialabtrag

Hinsichtlich der für OS-Systeme verwendeten Materialien gilt zum Widerstand gegenüber Rissbewegungen (dyn. Last):

Glas \leq Zementgebundene Systeme \leq Epoxidharz $<$ Polymerdispersionen $<$ Polyurethan.

Hinsichtlich des Widerstands gegenüber Reibung gilt hingegen:

Polymerdispersion $<$ Polyurethan $<$ Epoxidharz $<$ zementgebundene Systeme $<$ Glas.

Siliziumorganische Verbindungen sind hierbei nicht aufgeführt, da diese in den Untergrund eindringen und sich dort als sprödes Material entsprechend dem Beton verhalten. Das heißt sie weisen keine Rissüberbrückungsfähigkeit auf und werden mit dem Bindemittel des Betons abgerieben.

Die Versagensmechanismen bei zementgebundenen Systemen werden signifikant durch die Größe der Partikel und der Gesteinskörnungen beeinflusst. Betone/Mörtel mit hohem Verschleißwiderstand beinhalten verschleißfeste Zuschlagsarten, wie z. B. quarzitisches Gesteinskörnung, geringe w/z-Werte, hochfeste Zemente und Zusatzstoffe sowie eine lange Nachbehandlung. Bei sehr starker Beanspruchung kann jedoch der Schutz der Betonoberfläche durch spezielle Maßnahmen, wie z. B. Hartstoffestrich, erforderlich sein.

3.2.5 CHEMISCH/PHYSIKALISCH/MECHANISCH

POLYMERBASIERTE OS-SYSTEME

Für gewöhnlich treten die aufgeführten Schadensmechanismen kombiniert auf, wodurch die Schadensentwicklung im Allgemeinen beschleunigt wird. Insbesondere durch die Einwirkungen Wasser, Temperatur und Betonfeuchte mit Alkalien erfolgt die Kombination aller drei Schadensmechanismen.

Bild 3–6 verdeutlicht die Vorgänge bei Polymeren in flüssigen Medien, wie z. B. Wasser. Diese werden durch die Temperatur beschleunigt.

Ein Schaden der speziell bei polymeren Beschichtungen auftritt sind Blasen innerhalb des OS-Systems. Dabei können im Wesentlichen drei unterschiedliche Arten von Blasen entstehen, wie in Bild 3–7 erläutert.

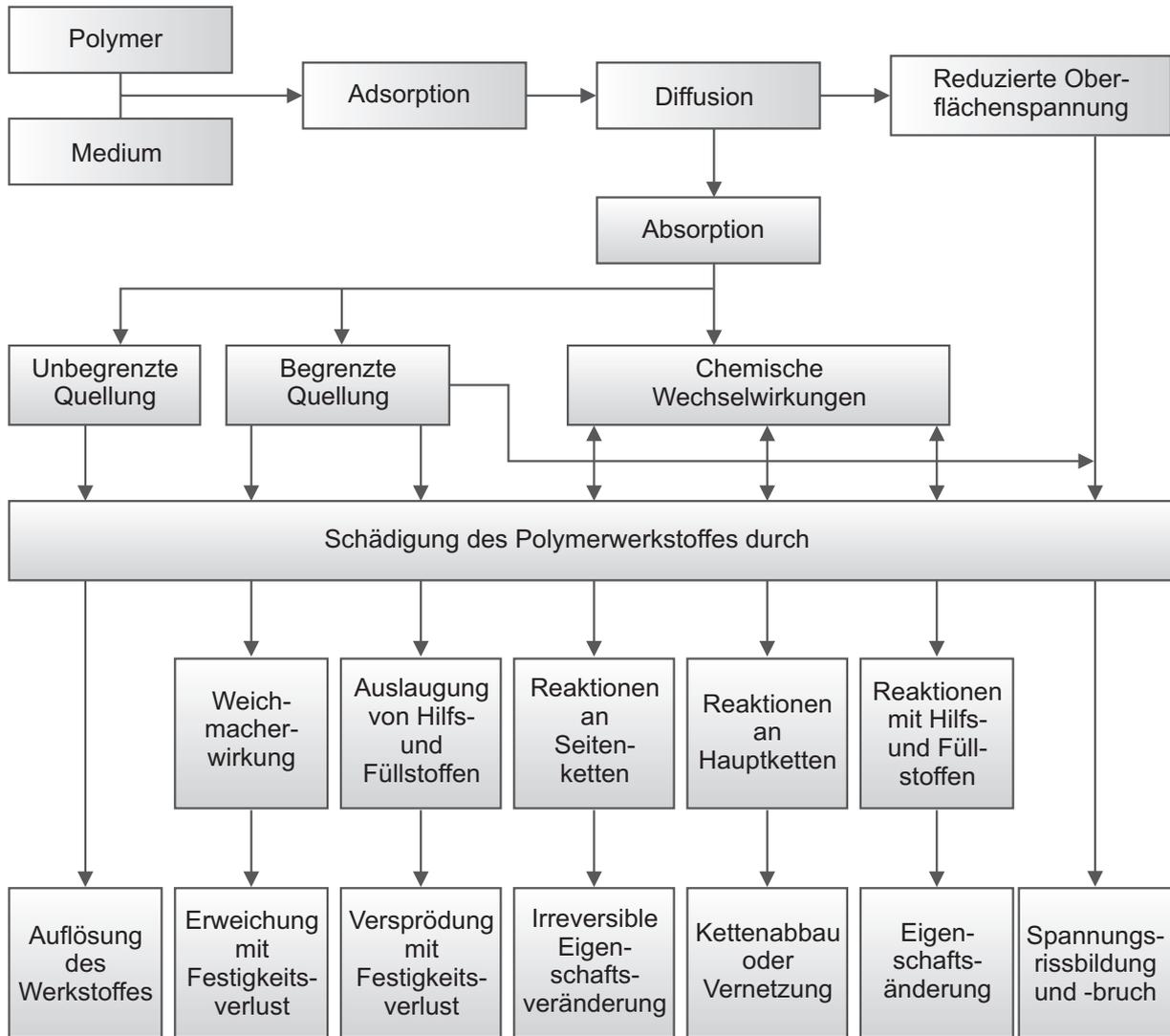


Bild 3–6: Schädigungsvorgänge bei Polymeren in flüssigen Medien, in Anlehnung an /Kra03/

Blasen die direkt bei der Applikation entstehen sind häufig auf verarbeitungsbedingte Lufteinschlüsse im Beschichtungsmaterial oder aus dem Untergrund entweichende Luft zurückzuführen /Klo76/, /Loh07/. Die zwei anderen Arten von Blasen entstehen Wochen, Monate bis Jahre nach der Applikation.

Entstehen Blasen bzw. großflächige Delaminationen zwischen Beton und Grundierung trifft im Allgemeinen eine Reihe von Faktoren zusammen /Wol09/: Erstens, das Polymer ist unzureichend vernetzt bzw. verfilmt. Zweitens, die Untergrundvorbehandlung war unzureichend. Drittens, der Beton war vor der Materialapplikation maximal an der Oberfläche abgetrocknet und der Kernbereich ist nahezu wassergesättigt. Oft steht bei diesen Schäden von der anderen Seite des Betonbauteils Wasser an (z. B. Außenbeschichtung von Trinkwasserbehältern oder Abwasseranlagen). Durch den Wassertransport liegt langfristig eine rückseitige Durchfeuchtung der Beschichtung vor, das Material quillt und es entstehen Zwangsspannungen im Polymer. Dadurch, dass das Wasser innerhalb des Betons kapillar in Richtung Beschichtung transportiert wird, die Poren teilweise aber auch mit Luft gefüllt sind, kann es letztendlich zu einem so genannten „Kapillardruck“ kommen, der den Verbund zwischen Grundierung und Beton lokal aufhebt. Durch Temperaturänderungen kann der „Kapillardruck“ zusätzlich beeinflusst werden.

Nach /Bod11/ wird die Entstehung von Blasen zwischen Betonoberfläche und Grundierung bei Dickbeschichtungen mit Reaktionsharzen auch durch die Alkalireaktivität (AKR) der Gesteinskörnung beeinflusst: Je reaktiver die Gesteinskörnung, desto mehr Blasen entstehen. Bei einer Grundierung mit einem relativ hohen Anteil an Benzylalkohol und einer Applikation auf Betonplatten mit alkalireaktiver Gesteinskörnung ohne Abstreuerung der Grundierung, traten nach ca. einem Monat erste kleine Blasen auf. Es wurden deutliche Ablösungen unterhalb der Grundierung verstärkt über reaktive Gesteins- bzw. Glaskörner festgestellt. Im Laufe eines Jahres bei rückseitiger Betondurchfeuchtung kam es zu einer Vermehrung und Vergrößerung der sich ablösenden Bereiche /Bod11/.

BLASENART		
Luftblasen	Blasen/Delamination zwischen Beton und Grundierung	Blasen zwischen Grundierung und Beschichtung
ZEITPUNKT DER ENTSTEHUNG		
Direkt bei Applikation	Einige Wochen bis Monate bzw. Jahre nach der Applikation	
TYPISCHE OS-SYSTEME		
Alle Beschichtungen	Alle Beschichtungen	Dickbeschichtungen mit Reaktionsharzen
URSACHEN		
Verarbeitungsbedingte Lufteinflüsse im Material Aus dem Untergrund entweichende Luft	Unzureichend vernetztes bzw. verfilmtes Polymer + unzureichende Untergrundvorbehandlung + Wassergehalt im Betonkern nahe Wassersättigung, betonseitig anstehendes Wasser → rückseitige Durchfeuchtung → Quellen der Beschichtung → Zwangsspannungen + Kapillardruck → Aufhebung des geschwächten Verbundes + ggf. druckdichte Deckversiegelung + ggf. AKR der Gesteinskörnung	Bei Polyurethan: Nebenreaktion der Isocyanate mit Wasser Fehlstellen in der Grundierung + Wasser im Beton + druckdichte Deckversiegelung + Kapillardruck in den Betonporen
BEISPIELE		
Polyurethanbeschichtung	Aussenbeschichtung am Wasserbehälter	Parkhausbeschichtung OS 11

Bild 3-7: Übersicht zur Entstehung von Blasen innerhalb von OS-Systemen

Entstehen Blasen zwischen Grundierung und Beschichtung kann dies zwei Gründe haben: Eine Delamination zwischen Grundierung und nachfolgender Polyurethanbeschichtung kann durch Bläschenbildung in der der Grundierung zugewandten Seite der Polyurethanschicht verursacht werden. Die Ursache der Bläschenbildung ist auf eine Nebenreaktion der Isocyanatkomponente der Polyurethanbeschichtung mit Wasser, z. B. infolge einer Taupunktunterschreitung des Untergrundes beim

Auftrag, zurückzuführen. Die durch die Reaktion der Isocyanatkomponente mit Feuchtigkeit hervorgerufene Bläschenbildung führt zu einer Schwächung des Verbundes zwischen Grundierung und nachfolgender Beschichtung, so dass bereits geringe Drücke aus dem Beton oder eine mechanische Beanspruchung durch Verkehr zu einer lokalen bis großflächigen Delamination der Polyurethanbeschichtung führen können /Pus10/, /Wol08/.

Beim zweiten Grund muss wieder eine Reihe von Randbedingungen erfüllt sein /Wol09/: Erstens Fehlstellen in der Grundierung liegen vor. Zweitens Wasser befindet sich im Beton. Drittens das OS-System hat eine druckdichte Deckversiegelung und viertens es entstehen wieder die zuvor beschriebenen „Kapillardrücke“ im Beton. Durch die Fehlstellen der Grundierung gelangt dann alkalische Lösung zwischen Grundierung und Beschichtung, die sich aufgrund des rückseitigen Kapillardrucks und der druckdichten Deckversiegelung in Blasen ansammelt.

Die erläuterten Prozesse hinsichtlich des Kapillardrucks, der in der beschriebenen Wirkkette letztendlich der Auslöser für die Blasenbildung ist, sind unter Fachleuten umstritten. Eine andere diskutierte Erklärung ist die Bildung von Blasen infolge osmotischer Vorgänge /Klo74/. Hiergegen spricht nach Wolff /Wol09/ jedoch die Zusammensetzung der analysierten Blasenflüssigkeiten.

ZEMENTGEBUNDENE OBERFLÄCHENSCHUTZSCHICHTEN

Der Angriff von Frost und Tausalz bedingt eine Kombination aus physikalischer und chemischer Schädigung. Im Zementstein erniedrigen

- hohe Drücke,
- gelöste Stoffe in der Porenlösung und
- die Wirkung von Oberflächenkräften

die Gefrierpunktttemperatur. Zusätzlich kann die Gefrierpunktttemperatur unterschritten werden und dennoch entsteht keine Eisbildung. Dieser als Unterkühlung bezeichnete metastabile Zustand folgt stochastischen Gesetzmäßigkeiten. Die Faktoren bedingen, dass bei mitteleuropäischen Klimabedingungen beim Auftreten von Frost nur ein kleiner Teil des Porenwassers gefroren vorliegt (bei -20 °C maximal 30 % des Gesamtwassers).

Bei den bislang bekannten Mechanismen, die zu einem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Schaden führen, kann zwischen

- Mechanismen die makroskopische Spannungen hervorrufen und
- Mechanismen die Veränderungen im mikroskopischen Zementsteingefüge bewirken

unterschieden werden /Sta01/.

Makroskopische Spannungen werden nach /Sta01/ durch unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten von Eis und Zementstein, schichtenweises Gefrieren insbesondere bei Tausalzeinwirkung und Temperatursturz infolge aufgebrachter Taumittel hervorgerufen. Mikroskopische Veränderungen im Zementsteingefüge treten infolge hydraulischen Druckes durch die Volumenausdehnung beim Phasenübergang Wasser-Eis, kapillarer Effekte, Osmose/Diffusion, Oberflächenspannungen und Kristallisationsdrücken auf. Eine Schädigung des Betons durch die Expansion des Eises und den damit erzeugten hydraulischen Drücken ist nur relevant, wenn ein kritischer Sättigungsgrad erreicht ist. Zur Erklärung, wie dieser kritische Sättigungsgrad erreicht wird, hat Setzer /Set99/ das Modell der Mikrolinsenbildung und der Mikrolinsenpumpe erarbeitet.

Die Anzahl der Schadensursachen deutet daraufhin, dass die Schädigungsmechanismen beim Frost-/Frost-Tausalz-Angriff auf Beton äußerst komplex und nicht ausschließlich durch die Volumenzunah-

me des Wassers beim Gefrieren zu erklären sind.

3.3 VERMEIDUNG VON SCHÄDEN

3

3.3.1 ALLGEMEINES

Entsprechend den Erläuterungen im Abschnitt 3.1 gibt es Schäden an OS-Systemen die vermeidbar sind. Hierfür müssen sowohl der Betonuntergrund, die Materialien, der Aufbau der OS-Systeme als auch die Witterung gewisse Anforderungen erfüllen, die im Folgenden erläutert werden. Durch die Einhaltung dieser Anforderungen, können insbesondere Schäden infolge unzureichender Adhäsion vermieden werden.

3.3.2 ANFORDERUNGEN AN DEN UNTERGRUND

OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT UND OBERFLÄCHENZUGFESTIGKEIT DES UNTERGRUNDS

Für die Applikation von Oberflächenschutzsystemen muss der Betonuntergrund entsprechend RL-SIB /DAf01/

- frei sein von losen und mürben Teilen sowie von sich leicht ablösenden arteigenen Schichten (z. B. Zementhaut) und darf nicht abmehlen oder absanden,
- frei sein von etwa parallel zur Oberfläche oder schalenförmig im oberflächennahen Bereich verlaufenden Rissen und Ablösungen,
- frei sein von Graten,
- eine dem zu verwenden Stoff angepasste Rauheit aufweisen,
- frei sein von artfremden Stoffen (wie Gummiabrieb, Trennmittel, ungeeignete Altbeschichtungen, Ausblühungen, Öl, Bewuchs u. ä.).

Kiesnester, Hohlstellen und Risse sind sachgerecht auszuarbeiten und zu füllen. Weitergehende Erläuterungen zur Oberflächenrauheit und Ebenheit können z. B. /Mom06/ entnommen werden.

Der zu beschichtende Betonuntergrund muss die in Tab. 3–6 aufgeführten Oberflächenzugfestigkeiten mindestens aufweisen /DAf01/. Die erforderliche Oberflächenzugfestigkeit hängt von dem geplanten Oberflächenschutzsystem ab. Um den zu erwartenden üblichen Streuungen Rechnung zu tragen, ist neben dem Mittelwert auch der kleinste Einzelwert anzugeben. Für Maßnahmen zum Schutz und zur Instandsetzung von unbewehrten und bewehrten Wasserbauwerken aus Beton gelten die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W). Vorhaben zum Schutz und zur Instandsetzung von Betonbauteilen an Brücken und vergleichbaren Ingenieurbauwerken im Geschäftsbereich Bundesfernstraßen werden durch die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) geregelt. Während die ZTV-ING die gleichen Mindestwerte an Oberflächenzugfestigkeiten des Betonuntergrundes fordert wie die RL-SIB, stellt die ZTV-W weitergehende Anforderungen für den Fall des Einsatzes von unbewehrten Spritzmörteln/

Spritzbetonen. Diese sind ebenfalls in Tab. 3–6 zusammengefasst.

Tab. 3–6: Geforderte Oberflächenzugfestigkeiten $f_{t,s}$ des Untergrundes nach RL-SIB /DAf01/ und nach ZTV-W /ZTVW/

Schutz- bzw. Instandsetzungsmaßnahme: Örtliche Ausbesserung bzw. Oberflächenschutzsystem nach RL-SIB	Mindestwerte der Oberflächenzugfestigkeit in N/mm ²		
	Mittelwert	kleinster Einzelwert	
Mörtel und Beton	1,5	1,0	
OS 2	0,8	0,5	
OS 5 (ohne Feinspachtel)	1,0	0,6	
OS 4, OS 5, OS 9 (mit Feinspachtel)	1,3	0,8	
OS 11, OS 13	1,5	1,0	
OS 8	2,0	1,5	
Erweiterung im Wasserbaubereich nach ZTV-W LB 219			
Spritzmörtel/Spritzbeton unbewehrt	S-A2 ¹⁾	0,8	0,5
	S-A3 ²⁾	1,2	0,8
	S-A4 ³⁾	1,5	1,0

¹⁾ Altbetonklasse nach Tabelle 0.2 der ZTV-W mit Druckfestigkeit > 10 N/mm²

²⁾ Altbetonklasse nach Tabelle 0.2 der ZTV-W mit Druckfestigkeit > 20 N/mm²

³⁾ Altbetonklasse nach Tabelle 0.2 der ZTV-W mit Druckfestigkeit > 30 N/mm²

UNTERGRUNDVORBEHANDLUNG

Vor der Applikation von OS-Systemen auf Betonbauwerken ist entsprechend der vorangegangenen Erläuterungen eine Untergrundbearbeitung unverzichtbar. Der Erfolg und die Dauerhaftigkeit jeder Maßnahme hängen zunächst von der Untergrundvorbereitung ab. Auf jeden Fall ist die Betonoberfläche wenigstens zu säubern. Die Art der Untergrundbearbeitung richtet sich nach der Art der Beeinträchtigung und dem zu erreichenden Zustand. Häufig angewandte Verfahren zur Untergrundvorbehandlung sind Fräsen (Kloppfräse, Walzenfräse) und Strahlen (Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel, Feuchtstrahlen mit festem Strahlmittel, Hochdruckwasserstrahlen). Oft ist eine mehrstufige Bearbeitung, z. B. Fräsen und Kugelstrahlen, erforderlich. Eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren zur Untergrundvorbereitung kann /Mom06/ entnommen werden.

Durch die Untergrundvorbereitung werden nicht nur lose anhaftende sowie minderfeste Betonbestandteile, Verunreinigungen und artfremde nicht fest haftende Beschichtungen, Trennmittelrückstände, Nachbehandlungsfilm entfernt, sondern – je nach Verfahren – auch Veränderungen im Betongefüge der Randzone vorgenommen. Schlagend wirkende oder thermische Verfahren können je nach Intensität das Gefüge des verbleibenden Betons lockern und die Festigkeit herabsetzen. Deshalb ist bei solchen Verfahren stets ein nachfolgender Arbeitsschritt erforderlich /Mom06/. Dabei ist bei der mechanischen Behandlung vom gröberen zum feineren Verfahren fortzuschreiten. In Abhängigkeit von der Porosität des Betons können entstandene Gefügestörungen durch niedrigviskose Imprägnierungen gegebenenfalls verfestigt werden. Die Wirkung einer Verfestigung auf die Oberflächenzugfestigkeit ist jedoch objektspezifisch zu überprüfen.

Bild 3–8 gibt einen Überblick über die Auswirkung unterschiedlicher Verfahren auf die Oberflächenzugfestigkeit eines Betons C 30/37. Demnach wurden mit dem Kugelstrahlverfahren mittlerer Rautiefe die höchsten Oberflächenzugfestigkeiten erreicht, während große Rautiefen zu einer Reduktion der Oberflächenzugfestigkeit gegenüber der unbehandelten Betonoberfläche führten. Die geringsten

Werte wurden nach dem Walzenfräsen vor der Nachbereitung durch Kugelstrahlen gemessen.

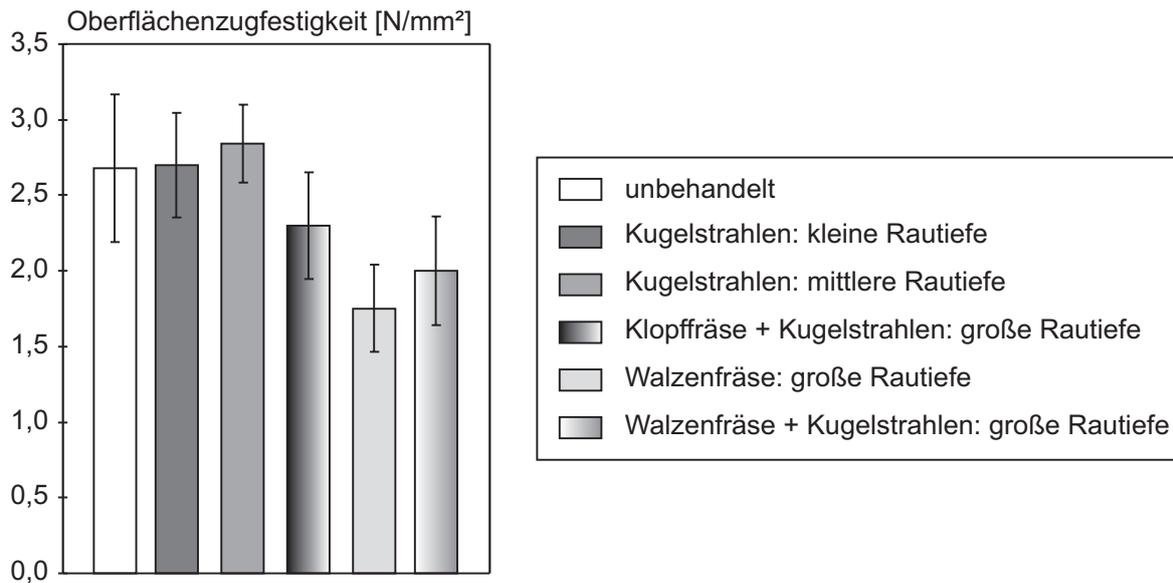


Bild 3-8: Oberflächenzugfestigkeiten unterschiedlich behandelter Betonoberflächen (Beton C30/37) nach /Rau06/

SCHÄDLICHE BESTANDTEILE IM OBERFLÄCHENNAHEN BETON

Befinden sich Substanzen wie z. B. Sulfate oder Chloride im Stahlbeton so können diese langfristig Schäden im Untergrund der OS-Systeme hervorrufen. Damit wäre ein Adhäsionsverlust zwischen Beton und OS-System verbunden. Deswegen sind vor der Durchführung der Instandsetzungsmaßnahme Art und Gehalt an Schadstoffen in einem Tiefenprofil im oberflächennahen Beton zu bestimmen. Die Betonoberfläche ist danach soweit abzutragen bis der Gehalt an Schadstoffen unterhalb eines kritischen Wertes liegt. Nähere Angaben hierzu befinden sich in /Rau08a/.

WASSERGEHALT IM BETON

Basierend auf veralteten Regelwerken wird häufig die Zahl 4 M.-% (gemessen mit dem CM-Gerät) als kritischer Wassergehalt im Beton für die Applikation von Polymerbeschichtungen genannt. Dieser absolute Zahlenwert ist jedoch nicht haltbar, da der zulässige Wassergehalt von einer Vielzahl an Parametern, u. a. Zementgehalt, Wasserzementwert und Porenvolumen, abhängt. Zusätzlich kann sich der Feuchtegradient im Beton nach einer Beschichtung durch veränderte Diffusionsverhältnisse verschieben und damit die Feuchte an der Beschichtung beeinflussen. Ein drittes Problem bei der Angabe eines festen zulässigen Wassergehaltes ist die häufig ungenaue Bestimmung des Wassergehaltes. Lediglich der Darrversuch erlaubt direkte Rückschlüsse auf den Wassergehalt in M.-% an der untersuchten Stelle.

Der zulässige Wassergehalt des Betons für polymere Beschichtungen wird von der Art des eingesetzten flüssigen Beschichtungsmaterials bestimmt. Acrylate, Epoxidharze und Polyurethane reagieren i. d. R. während der Aushärtung empfindlich auf Untergrundfeuchte und Niederschlagseinwirkungen. Das Wasser kann die Erhärtungsreaktionen behindern, den Verbund zum Untergrund stören oder unerwünschte Nebenreaktionen wie Schaumbildung bei Polyurethanen auslösen.

Die Eindringtiefe von Hydrophobierungen in die Kapillarporen des Betons und die Benetzung der Porenwandungen verschlechtern sich mit zunehmender Wasserfüllung des Kapillarporengefüges.

Dies wirkt sich unmittelbar auf die Dauerhaftigkeit der Hydrophobierung aus.

Somit gilt im Allgemeinen:

- Die polymerbasierten OS-Systeme nach Bild 2–17 bis Bild 2–21 erfordern einen trockenen bis höchstens feuchten Betonuntergrund. Bei Polymerdispersionen und speziell dafür entwickelten Epoxidharzen kann der Untergrund feucht sein.
- Für das Aufbringen zementgebundener Beschichtungen und Spritzmörtel mit oder ohne Polymerzusatz muss der Untergrund mattfeucht sein.

BETONTEMPERATUREN

Die Temperatur des Untergrunds beeinflusst den Erhärtungsverlauf und die Eigenschaften ausgehärteter Beschichtungen stärker als die Temperatur der Umgebungsluft, weil der Wärmeaustausch unmittelbar durch Wärmeleitung erfolgt und kein hoher Wärmeübergangswiderstand zu überwinden ist. Zusätzlich ist die Kontaktfläche im Verhältnis zum Volumen der Beschichtung sehr groß, so dass diese rasch die Temperatur des Untergrundes annehmen. Allgemein gilt, dass niedrige Temperaturen die Erhärtungszeit verlängern, während höhere sie verkürzen. Auch die Verarbeitungszeit wird durch hohe Temperaturen verkürzt.

Richtwerte für die Temperaturen des Betonuntergrundes und der unmittelbar anstehenden Luftschicht in Abhängigkeit vom aufzubringenden Material sind in Tab. 3–7 zusammengefasst. Generell müssen während des Aufbringens eines Materials und im angemessenen Zeitraum danach die für das jeweilige Material im Datenblatt genannten Bereiche der Temperaturen eingehalten werden.

Die Oberflächentemperatur des Betons bzw. bei mehrlagigen Beschichtungen die jeweils obere Schicht muss für polymergebundene Stoffe immer mindestens 3 K über der Taupunkttemperatur liegen, um Kondenswasserbildung auf der Oberfläche zu vermeiden. Weiterhin ist die Entwicklung der Temperaturen für den Zeitraum der Ausführung und Erhärtung zu beachten.

Tab. 3–7: Grenztemperaturen des Betonuntergrundes und der unmittelbar überlagernden Luftschicht (Richtwerte) nach RL-SIB /DAf01/

Aufzubringender Stoff	Temperatur in °C	
	Kleinstwert	Größtwert
Zementgebundene Stoffe, auch mit Polymerzusatz	5	30
Reaktionsharze und Reaktionsharzmörtel/-betone	8	40
Hydrophobierungen	8	25
einkomponentige, lösemittelhaltige Oberflächenschutzsysteme	8	30
wasserdispergierbare Oberflächenschutzsysteme	10	40

Nach ZTV-ING /ZTV03/ gelten für Spritzbeton folgende Regelungen:

- Spritzbeton darf nur aufgebracht werden, wenn die Temperatur der Auftragsfläche mindestens 3 °C beträgt.
- Sind während der Ausführung Luft- und Bauteiltemperaturen unter 3 °C zu erwarten, sind die Arbeiten einzustellen oder besondere Maßnahmen zu ergreifen, die ein Absinken der Temperaturen unter diese Grenzwerte verhindern.
- Werden Spritzbetonarbeiten bei heißer Witterung durchgeführt, sind Vorkehrungen zu treffen, damit die Temperatur der Betonunterlage 25 °C nicht überschreitet.

3.3.3 WITTERUNG BEI DER AUSFÜHRUNG VON APPLIKATIONEN

Die Witterung beeinflusst ebenfalls den Erhärtungsverlauf und damit die Eigenschaften ausgehärteter Beschichtungen. Somit müssen beim Aufbringen der Materialien die in Tab. 3–8 aufgeführten Witterungsbedingungen eingehalten werden, insofern der Hersteller keine abweichenden Angaben macht. Ist absehbar, dass die Anforderungen an die Witterungsbedingungen bei der Verarbeitung der Materialien nicht eingehalten und die Arbeiten zeitlich nicht verschoben werden können, sind entsprechende Schutzmassnahmen (Einhausungen, beheizte Zelte, etc.) erforderlich.

Tab. 3–8: Witterungsbedingungen bei der Materialapplikation nach RL-SIB /DAf01/

Exposition	zementgebundene Stoffe, auch mit Polymerzusatz	polymergebundene Stoffe
relative Luftfeuchte	keine Forderung	Bauteiltemperatur muss min. 3 K über dem Taupunkt liegen
Niederschlag	kein Regen	kein Regen oder Nebelnässe
Wind	Windstärke ≤ 3 Beaufort ^{*)} , entsprechend \leq ca. 5 m/s	Staub muss ferngehalten werden
Sonne	Austrocknung durch Sonneneinstrahlung muss vermieden werden	keine Anforderung

*) Blätter und dünne Zweige bewegen sich

3.3.4 MATERIALIEN, AUFBAU DER OS-SYSTEME, SCHICHTDICKEN

Ein großer Teil der Mängel und Schäden an Oberflächenschutzmaßnahmen ist auf die Verwendung von für den spezifischen Anwendungsfall ungeeigneten Materialien zurückzuführen. Daher hat die Auswahl geeigneter Materialien eine zentrale Bedeutung für den Erfolg der Maßnahmen. Sie erfolgt in Deutschland zurzeit nach der RL-SIB und in Europa i. d. R. auf Basis der EN 1504.

Die Auswahl der Baustoffe erfolgt nach RL-SIB /DAf01/ über in Klassen eingeteilte Produktsysteme, denen meist in Form von Tabellen Anwendungsbereiche zugeordnet sind. Die Anforderungen an die nachzuweisenden Eigenschaften der Produktklassen und die zugehörigen Prüfverfahren sind in der RL-SIB beschrieben. Im Gegensatz dazu erfolgt in der EN 1504 die Spezifikation des Baustoffs oder Systems über Leistungsmerkmale.

Mit der europäischen Normung von Produkten und Systemen für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken (DIN EN 1504) entsteht in Deutschland ein Umbruch hinsichtlich der bisherigen Vorgehensweisen in diesem Bereich. Bisher war der Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken in der RL-SIB /DAf01/, der ZTV-ING /ZTV03/ sowie für spezielle Fragenstellungen im Wasserbau in der ZTV-W /ZTVW/ geregelt. Innerhalb dieser Regelwerke wurden auch die notwendigen Leistungsanforderungen mitsamt Prüfverfahren festgelegt. Insbesondere hinsichtlich der Prüfverfahren bestand eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der RL-SIB und der ZTV-ING. Dabei stand i. d. R. die Prüfung am Gesamtsystem im Vordergrund.

Mit der Erarbeitung der DIN EN 1504 wurden auch die jeweils festgelegten Prüfverfahren europäisch genormt. Insgesamt sind in diesem Rahmen 61 zusätzliche Prüfnormen entstanden, gleichzeitig werden jedoch auch bestehende europäische Normen aus anderen Bereichen sowie internationale Normen (ISO – Internationale Organisation für Normung) genutzt. Diese Prüfnormen wurden inzwischen vollständig veröffentlicht und stellen eine wesentliche Grundlage für die CE-Kennzeichnung dar. Über so genannte Restnormen, DIN V 18026 für Oberflächenschutz, werden in Deutschland zu-

sätzliche Prüfungen gefordert, damit der Standard der bisherigen Regelwerke aufrechterhalten wird. Langfristig wird sich jedoch eine europaweite einheitliche Vorgehensweise ausbilden. Die übergangsweise in Deutschland nach DIN V 18026 zusätzlich geforderten Prüfungen sind in den Regelwerken RL-SIB /DAf01/, ZTV-ING /ZTV03/ bzw. ZTV-W /ZTVW/ erläutert.

Demnach erfolgen Prüfungen an den Ausgangsstoffen und am angemischtem sowie ausgehärtetem Material. In den Datenblättern der Materialien sind wesentliche Kennwerte wie Viskosität, Verarbeitungszeiten und Art der Verarbeitung angegeben. Diese Angaben sind auf der Baustelle einzuhalten, um die mögliche Leistungsfähigkeit des Systems auch realisieren zu können.

Für den Erfolg einer Oberflächenschutzmaßnahme ist auch die fachgerechte Planung von entscheidender Bedeutung. Dies betrifft vor allem die Auswahl geeigneter Materialien und Systeme, basierend auf den individuellen Randbedingungen des Projektes. Die Randbedingungen des Projektes beruhen sowohl auf dem Ausgangszustand des Bauwerks als auch dem mit dem Eigentümer/Betreiber festzulegenden Ziel der Maßnahme.

Ist ein geeignetes Oberflächenschutzsystem ausgewählt, sind die zuvor erläuterten Randbedingungen bei der Applikation des Systems einzuhalten. Hierzu zählt auch das Einhalten der Materialschichtdicken. Die Ermittlung der erforderlichen Mindesttrockenschichtdicken wurde im Abschnitt 2.5 erläutert. Gemäß RL-SIB /DAf01/ muss die Mindestschichtdicke d_{\min} der hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht (hwO) auf 95 % der zu bearbeitenden Flächen erreicht werden. 5 % der Fläche darf Minderdicken bis zu $0,7 \times d_{\min}$ aufweisen. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Beschichtungsmaßnahmen werden die Forderungen an die Mindesttrockenschichtdicke nach RL-SIB hinsichtlich des 5 %-Quantilwerts nicht eingehalten /Fie09/. Dies wirkt sich bei rissüberbrückenden OS-Systemen (OS 5, OS 9, OS 11, OS 13) unmittelbar Nachteilig auf die rissüberbrückenden Eigenschaften aus.

Bild 3–9 fasst nochmals zusammen, wie Schäden und Mängel vermieden werden können.

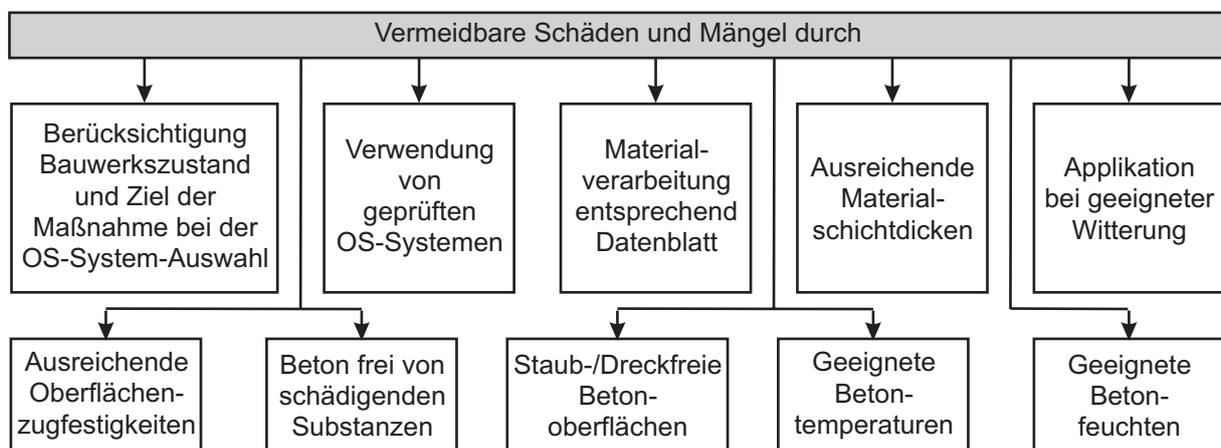


Bild 3–9: Randbedingungen zur Vermeidung von Schäden und Mängeln an OS-Systemen

3.4 PRÜFVERFAHREN

3.4.1 ALLGEMEINES

Dieser Abschnitt behandelt Prüfverfahren anhand derer Veränderungen einzelner Beschichtungen bzw. kompletter OS-Systeme untersucht werden können. Hierzu werden einerseits die Einwirkungen und andererseits die Messverfahren zur Ermittlung der Veränderungen benötigt. Eine wesentliche Einwirkung stellt die Luft und das Klima dar. Wie dies im Rahmen von Prüfverfahren berücksichtigt wird, ist Thema des Abschnitts 3.4.2. Laboruntersuchungen zum Einfluss weiterer Medien wie Wasser, Porenlösung und Schwefelsäure werden im Abschnitt 3.4.3 erläutert. Die Prüfverfahren, die eine mechanische Beanspruchung des Materials beinhalten, sind Bestandteil des Abschnitts 3.4.4. An den zuvor mit Luft, Klima und/oder weiteren Medien beanspruchten Proben werden ebenfalls diese mechanischen Prüfungen durchgeführt. Prüfverfahren, die nur zur Materialanalyse und nicht zur Materialbeanspruchung eingesetzt werden, sind Thema des Abschnitts 3.4.5.

Bei den dargestellten Prüfverfahren handelt es sich bis auf die visuelle Betrachtung sowie der Bestimmung der Massenänderung um zerstörende Prüfungen am Material. Im nachfolgenden Kapitel 4 wird dann ein neu für diese Fragestellungen entwickeltes zerstörungsfreies Prüfverfahren vorgestellt.

Hier wird somit nur auf Prüfverfahren zu Bestimmung von Material- bzw. Systemveränderungen eingegangen. Die europäisch genormten Prüfverfahren zur Charakterisierung von Oberflächenschutzsystemen sind in /Rau08/ ausführlich dargestellt. Die zusätzlich in Deutschland erforderlichen Prüfungen können der RL-SIB /DAf01/ entnommen werden.

3.4.2 BEWITTERUNG

Zum einen ist die Freibewitterung von Materialien/OS-Systemen mit langen Prüfzeiten verbunden und zum anderen sind die Einwirkungen nicht reproduzierbar. Aus diesem Grund werden neben der Freibewitterung definierte, beschleunigte Laborbewitterungen zur Materialprüfung durchgeführt. Diese Laborbewitterungen erfolgen in Kammern in denen mehrere Parameter variiert werden können, mit dem Ziel einige der zuvor erläuterten Schädigungsmechanismen auszulösen. Tab. 3–9 gibt einen Überblick über entsprechende am ibac aufgebaute Bewitterungseinrichtungen.

Tab. 3–9: Übersicht über die Bewitterungseinrichtungen

Gerät	Wesentliche Leistungsmerkmale
UV-Schrank	Temperatur: -30 bis 80 °C, Feuchte: 10 bis 80 % r. F. bei 10 bis 80 °C, Niederschlag: Regen, Wellenbereich Strahlung: 280 bis 400 nm, PC-gesteuert, Bestrahlungsfläche: 60 x 90 cm ²
Frost-Truhe, mit Wasser flutbar	Temperatur: -40 bis 80 °C, mit Wasser flutbar (Wassertemperatur: +15 bis +30 °C), frei programmierbare Zyklen, Prüfraumgröße: 66 x 120 x 80 cm ³
Frost-Truhe	Temperatur: -40 bis 80 °C, zeitprogrammierte Temperaturwechsel, Prüfraumgröße: 60 x 133 x 57 cm ³
Frost-Tausalz-Truhe „Setzer“	Temperatur: -20 bis 20 °C, zeitprogrammierte Temperaturwechsel, Probenlagerung in Behältern, Prüfraumgröße: 30 x 170 x 55 cm ³
Frost-Tausalz-Becken	Schockbeanspruchung in 2-Becken-Anlage, Becken 1: -15 °C, gesättigte NaCl-Lsg., Becken 2: 20 °C, Wasser, nicht programmierbar, Prüfraumgröße: 45 x 67 x 90 cm ³

Gerät	Wesentliche Leistungsmerkmale
Klimaschrank	Temperatur: -20 bis 180 °C, Feuchte: 10 bis 95 % r. F. bei 10 bis 96 °C, frei programmierbare Temperatur- und Feuchtwechsel, Prüfraumgröße: 95 x 110 x 100 cm ³
Begehbare Klimakammern	Kammer 1, frei programmierbar: Temperatur: -25 bis 60 °C, Feuchte: 10 bis 90 % r. F., Raumgröße: 238 x 234 x 400 cm ³ , Kammer 2, nicht programmierbar: Temperatur: 5 bis 60 °C, Feuchte: 30 bis 90 % r. F., Raumgröße: 238 x 234 x 400 cm ³
Gewitterregen-Einrichtung	Heizstrahler-Temperatur: 60 °C, Regen mit Wasser-Temperatur ~10 °C, zeitprogrammierter Wechsel von Bestrahlung und Regen, Prüffläche: 90 x 150 cm ²
Salzsprühkammer	Temperatur: Raumtemperatur bis 55 °C, Nebel: ~99 % r. F. ggf. mit Salz oder SO ₂ , Prüfraumgröße: 82 x 78 x 68 cm ³
VENUS	Temperatur: -20 bis 60 °C, Feuchte: 15 bis 95 % r. F. bei 8 bis 60 °C, Niederschlag: Regen, Nebel ggf. mit Salz, Wellenbereich Strahlung: 300 bis 1100 nm, PC-gesteuert, Bestrahlungsfläche: 120 x 170 cm ²
Temperierkammern für Universalprüfmaschinen	
Für Zwick 10 kN	Temperatur: -20 bis 120 °C, frei programmierbare Temperaturwechsel, Prüfraumgröße: 50 x 24 x 33 cm ³
Für INSTRON 150 kN	Temperatur: -30 bis 80 °C, frei programmierbare Temperaturwechsel, Prüfraumgröße: 50 x 24 x 33 cm ³
Für Zwick 150 kN	Temperatur: Raumtemperatur bis 1100 °C, zeitprogrammierbare Temperatursteigerung, Prüfraumgröße: ~40 x ~40 x 50 cm ³

Einparametrische Laborversuche, wie z. B. Temperaturwechsel, bilden die in der Natur ablaufenden Prozesse nur sehr unvollkommen und für weiterführende Materialanalysen meist nicht verwertbar ab. Außerdem hat sich herausgestellt, dass auch Zeitraffungen durch überhöhte Beanspruchungen zu groben Fehleinschätzungen führen können, wenn im Experiment dadurch Bedingungen geschaffen werden, die Prozesse auslösen, die bei natürlicher Bewitterung nicht auftreten /Mir96/.

Am ibac wurde aus diesen Gründen bereits vor über 20 Jahren eine Umweltsimulationsanlage realisiert, die den erläuterten Wissensstand weitgehend berücksichtigt und für unterschiedliche Baustoffarten geeignet ist. Hauptforderung war neben der Vielparametrigkeit der Einflussgrößen die Einhaltung von weitgehend naturnahen Grenzwerten der Witterungsgrößen (Maxima, Minima, Rampen, Kombinationen). Eine gewisse Zeitraffung sollte durch Witterungszyklen erreicht werden, in denen als wenig korrosionsfördernd erkannte Elemente ausgeblendet wurden. Es wurde also bewusst in Kauf genommen, gegenüber Freibewitterungen nur relativ geringe zeitliche Beschleunigungen zu erhalten. Der Vorteil der labormäßigen Simulation wurde also weniger in einer starken Zeitraffung als in einer reproduzierbaren naturnahen Schädigungserzeugung gesehen.

Die „Versuchsanlage zur Entwicklung naturnaher Umwelt-Simulationskonzepte“ (VENUS) erlaubt eine geregelte Beaufschlagung von Proben mit den Witterungselementen Sonne (UV- und IR-Strahlung), Regen, Frost-Tau-Wechsel, Temperaturwechsel, Luftfeuchtwechsel und Schadgas (SO₂, CO₂, NO₂). Auch Kondensationsvorgänge im Inneren von kapillarporigen Stoffen können gezielt eingestellt werden /Sas93/. In interdisziplinärer Zusammenarbeit wurde zunächst ein einwöchiger Zyklus, der alle genannten Elemente umfasst, entwickelt. Er repräsentiert extreme, aber in allen Minima, Maxima und Rampensteigungen naturnahe Wetterelemente eines mittleren mitteleuropäischen Jahres. Eine vereinfachte Darstellung zeigt Bild 3–10. Tab. 2–3 zeigt einen Vergleich der Klimadaten an den Orten Duisburg, Eifel, Korsika und Wank mit denen in der VENUS. Gegenüber den Freibewitterungsorten sind die Temperaturen in der VENUS im Durchschnitt höher, um Prozesse zu beschleunigen. Zudem werden mehr Temperatur-Wechsel durchgeführt, um daraus resultierende physikalisch/mechanische Schädigungsmechanismen zu beschleunigen. Aufgrund technischer Aspekte zur Auslegung

und Verteilung der Regendüsen ist die Regenmenge in der VENUS im Vergleich zu den Freibewitterungsorten deutlich zu hoch, dazu ist die durchschnittliche Regendauer geringer. In nachfolgenden Forschungsprojekten wurde dies mit dem in Bild 3–13 dargestellten Zyklus anhand längerer Nebelphasen angepasst.

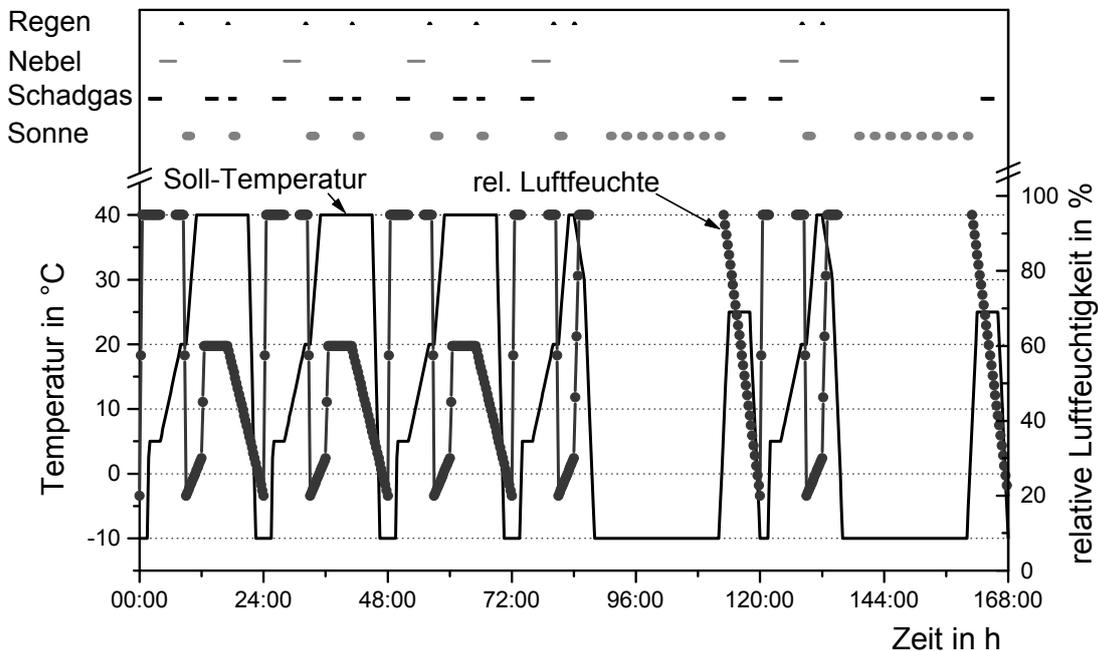


Bild 3–10: Einwöchiger VENUS-Zyklus zur Bewitterung von Baustoffoberflächen

Dieser einwöchige Zyklus besteht aus einem 24stündigen „Sommer“-Zyklus, bei dem Temperaturen bis zu 45 °C im berechneten Material vorliegen, und einem 48stündigen „Winter“-Zyklus, bei dem vermehrt Frost-Tau-Wechsel im Material entstehen. Der „Sommer“-Zyklus wiederholt sich in einer Woche 3mal bevor der „Winter“-Zyklus 2 mal folgt. In Bild 3–11 ist der „Sommer“-Zyklus dargestellt, während Bild 3–12 den „Winter“-Zyklus verdeutlicht. In beiden Bildern sind die jeweils im Beton in einer Tiefe von 1, 2, 4 cm gemessenen Temperaturen während der Bewitterung dargestellt. Auf die Einwirkung von Schadgas wurde bei der Bewitterung von OS-Systemen in der VENUS verzichtet. Die in der Umgebungsluft auftretenden Schadgase bedingen aufgrund der geringen Konzentration vermutlich keine wesentliche Beschleunigung der chemischen Schädigungsmechanismen und Umgebungen mit erhöhter Schadgasbelastung, z. B. in Kühltürmen, sollten bei den Versuchsreihen in der VENUS nicht nachgestellt werden.

Die Temperaturveränderungen im Beton sind sowohl bei steigender als auch bei sinkender Prüfraumtemperatur verzögert (Bild 3–11 und Bild 3–12). Die Wassertemperatur des Regens betrug 5 bis 7 °C, was bei Prüfraumtemperaturen von 40 °C zu einer messbaren Abkühlung des Betons führt (Gewitterregen, Bild 3–11). Infolge einer 60minütigen Globalstrahlung (Sonne) steigt die Betontemperatur um rund 10 °C an. Dies bedingt beim Zyklus 2 (Bild 3–12) in der Frostphase das Auftauen der Betonoberfläche innerhalb des ersten Zentimeters. Die Temperaturgradienten in der Betonoberfläche zwischen 1 und 4 cm Tiefe sind hierbei deutlich erkennbar.

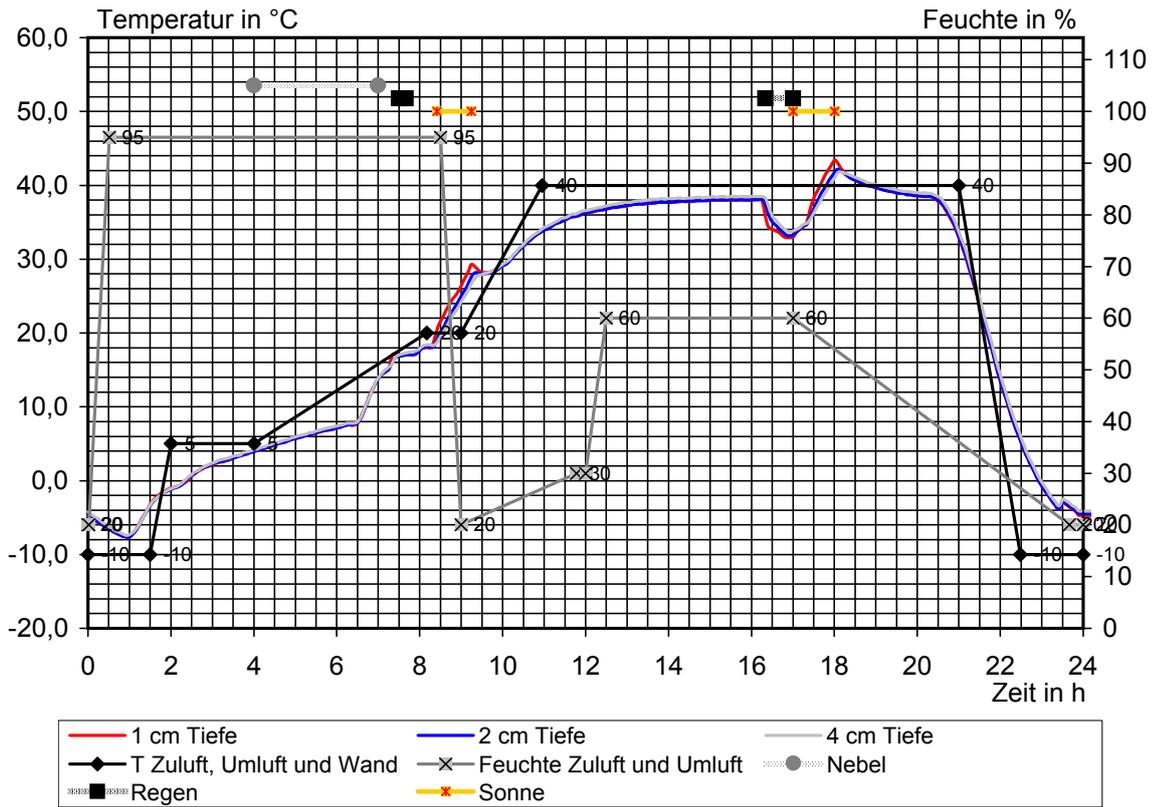


Bild 3-11: VENUS-Zyklus 1 mit IST-Temperaturen eines bewitterten Betonkörpers /Rau02/

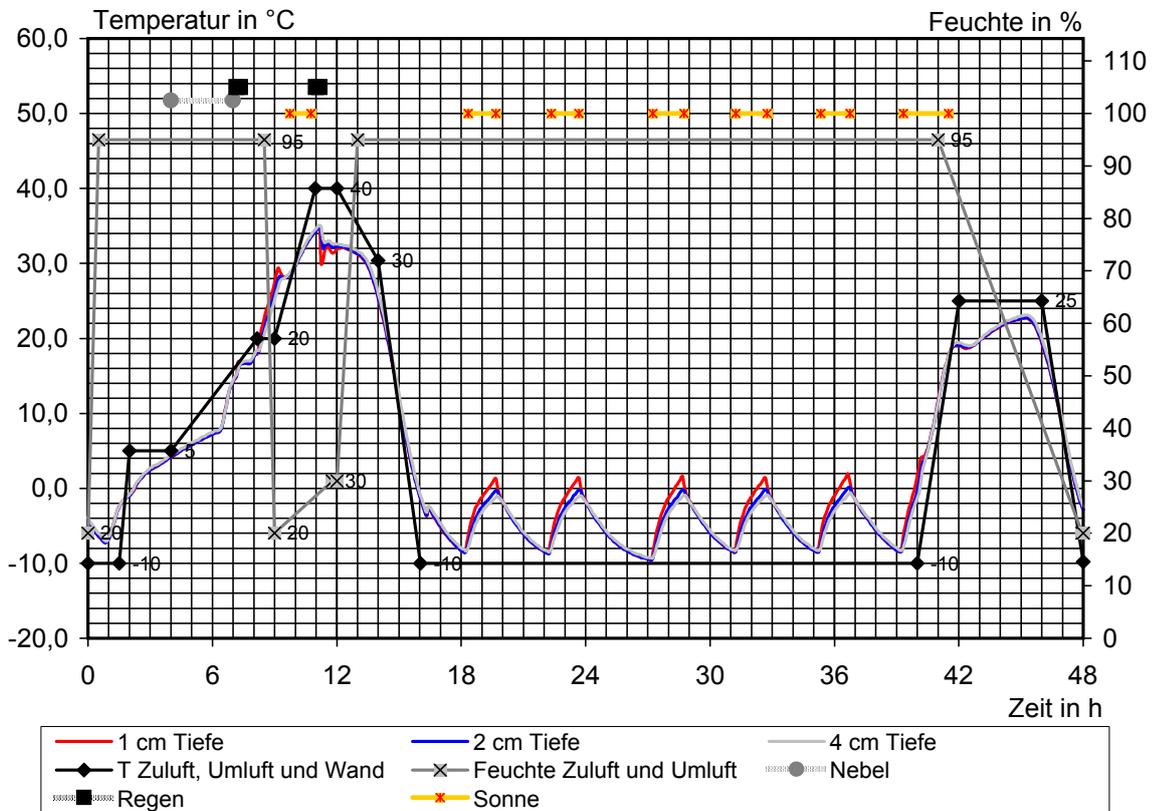


Bild 3-12: VENUS-Zyklus 2 mit IST-Temperaturen eines bewitterten Betonkörpers /Rau02/

Insbesondere für die komplexe Bewitterung von OS-Systemen mit Polymerdispersionen wurde der VENUS-Zyklus nochmals verändert. Hauptziel war es dabei Quell- und Schwindphasen im Material zusätzlich zu den Frost-Tau-Wechseln zu realisieren. Dafür wurden die Phasen der Wassereinwirkung (Regen, Nebel) basierend auf Voruntersuchungen deutlich verlängert. Bild 3–13 stellt den Bewitterungszyklus dar. Das Material erfährt sowohl im trockenen (nach 22 Stunden) als auch im nassen (nach 32 Stunden) Zustand starke Temperaturänderungen. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 5.3.3 erläutert.

3

Neben derartigen komplexen Laborbewitterungen sind Freibewitterungen zum Abgleich mit der realen Situation hilfreich. Bei der Auswahl der Freibewitterungsstandorte ist eine möglichst große Spannbreite an Klimaten, und damit unterschiedlichen Einwirkungen, sinnvoll.

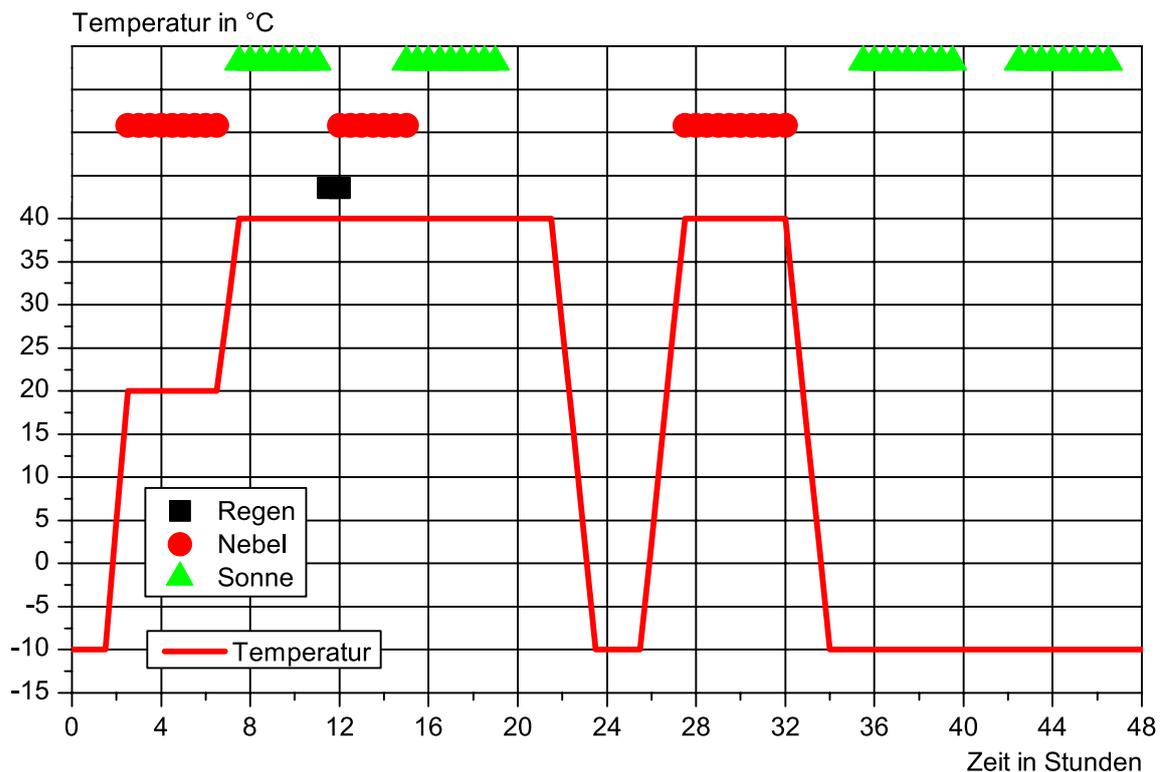


Bild 3–13: Bewitterungszyklus für OS-Systeme in der VENUS

Die zur künstlichen Bewitterung von OS-Systemen genormten Verfahren sind in Tab. 3–10 zusammengefasst. Eine ausführlichere Beschreibung kann /Rau08/ und den jeweiligen Normen entnommen werden. Die Bewitterungszyklen können in Temperatur-Wechsel-Beanspruchungen mit oder ohne Tausalz sowie UV-Beanspruchung untergliedert werden. In jedem Fall erfolgt eine zusätzliche Beanspruchung durch Wasser.

Tab. 3–10: Zusammenfassung angewandeter Labor-Bewitterungszyklen

Verfahren nach	Bewitterungsart	Zyklen / Dauer	Anschließende Prüfungen
/DAf01/, DIN EN 13687-2: 05.02	„Gewitterregen“ Trocken: 5 h 45 min bei $60\pm 5\text{ °C}$, Beregnung: 15 min bei $12\pm 3\text{ °C}$	10 / 6 h	Visuell, Haftzug, Gitterschnitt

Verfahren nach	Bewitterungsart	Zyklen / Dauer	Anschließende Prüfungen
/DAf01/ DIN EN 13687-3: 05.02	„Frost-Tauwechsel ohne Tausalzeinfluss“ Wasserlag.: 2 h bei 20±2 °C, abpumpen, Abkühlen der Luft: 3 h auf -15±2 °C, Luftlagerung: 4 h bei -15±2 °C, fluten, Wasserlag.: 1,5 h bei 20±2 °C, abpumpen, Luft erwärmen: 1,5 h auf 60±2 °C, Luftlagerung: 10 h bei 60±2 °C, fluten, Wasserlag.: 2 h bei 20±2 °C	20 / 24 h	Visuell, Haftzug
/DAf01/ ~ DIN EN 13687-1: 05.02	„Frost-Tauwechsel mit Tausalzeinfluss“ Zunächst „Gewitterregen“, dann 3 d Wasserlagerung, dann gesättigte NaCl-Lsg: 2 h bei -15±3 °C, Wasserlagerung: 2 h bei 20±3 °C	10 / 6 h 50 / 4 h	Visuell, Haftzug, Gitterschnitt
DIN EN 13581: 12.02	„Frost-Tausalz-Wechsel an hydrophobierten Betonen“ Lagerung in 3 % NaCl-Lsg.: 24 h bei 21 °C, in 2 h Temperatursenkung auf 0 °C, 2 h bei 0 °C, in 10 h Temperatursenkung auf -15 °C, 2 h bei -15 °C, Flutung mit Wasser 21 °C -> in 2,5 h Temperaturanstieg auf 21 °C, 4,5 h im Wasser bei 21 °C	50 / 24 h	Visuell, Masseänderung
DIN EN 1062-11: 10.02, /DAf01/	„UV-Bewitterung“ 4 h UV-Strahlung bei 60±3 °C (UV-A Lampe), 4 h befeuchten ohne UV-Strahlung bei 50±3 °C	1000 h bzw. 2480 h	Visuell, Dyn. Rissüberbrückung

3

3.4.3 PRÜFVERFAHREN MIT MEDIENBEANSPRUCHUNG

Tab. 3–11 gibt einen Überblick über Prüfungen an Oberflächenschutzsystemen bzw. deren Materialien mit Medienbeanspruchung. Die dargestellten Prüfungen wurden für die in den Kapiteln 5 bis 7 erläuterten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen verwendet. Neben den in Tab. 3–11 zusammengefassten Prüfungen stehen noch weitere Methoden, wie z.B. CO₂-Durchlässigkeit und Druckwasserbeaufschlagung zur Verfügung.

Tab. 3–11: Überblick über Prüfverfahren mit Medienbeanspruchung

Medium	Bestimmung	Methode	Prüfparameter
Wasser bzw. Porenlösung	Kapillare Wasseraufnahme	Wasserlagerung -> Ermittlung der Masseänderung in regelmäßigen Abständen	Wasserstand, Wassertemperatur, Zeitabstände des Wiegens, Dauer der Lagerung
Luftfeuchte	Wasserdampfdiffusion	Probenanordnung zwischen zwei verschiedenen Luftfeuchten -> Ermittlung der Masseänderung in regelmäßigen Abständen (Bild 3–14)	Anordnung der Luftfeuchten, Temperatur
Schwefelsäure bzw. andere schadhafte Medien	Eindringtiefe / Optik	Aufkleben von Zylinder (Ø 100 mm) auf das Material, z. B. 10 % Schwefelsäure in die Zylinder einfüllen, nach Standzeit x visuelle Beurteilung und chemische Materialanalyse (z. B. Sulfatgehalt)	Medium, Konzentration, Temperatur, Standzeiten, anschließende Analysen
	Diffusion durch OS-Schichten	Siehe Bild 3–15 und Beschreibung im Text	

Bei der Bestimmung der Wasserdampfdiffusion wird das zu untersuchende Material dampfdicht an

der Oberkante eines Prüfgefäßes eingeklebt. Die Prüfanordnung befindet sich in einem Raum mit definierter relativer Luftfeuchte und Temperatur. Aufgrund der unterschiedlichen Partialdrücke des Wasserdampfs zwischen Prüfgefäß (z. B. 93 % relative Luftfeuchte) und Prüfraum (z. B. 50 % relative Luftfeuchte) ergibt sich eine Wasserdampf-Diffusionsstromdichte durch das zu prüfende Material. Durch Wiegen der Prüfanordnung nach geeigneten Zeitspannen werden die Masseänderungen der Prüfanordnung bestimmt. Aus der Masseänderung und der Prüffläche wird die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte V in $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ nach Gleichung 3-1 ermittelt. A ist dabei die durchströmte Fläche in m^2 und G der gemessene Diffusionsstrom in g/h .

3

$$V = 24 \cdot \frac{G}{A}$$

Gleichung 3-1

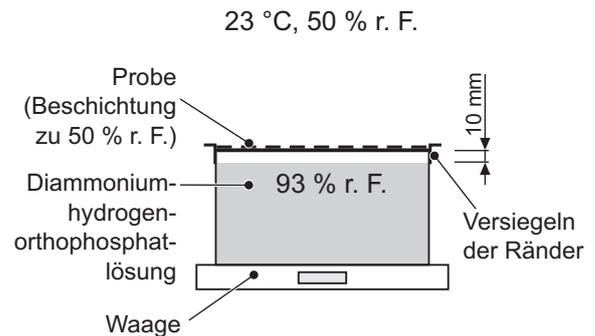
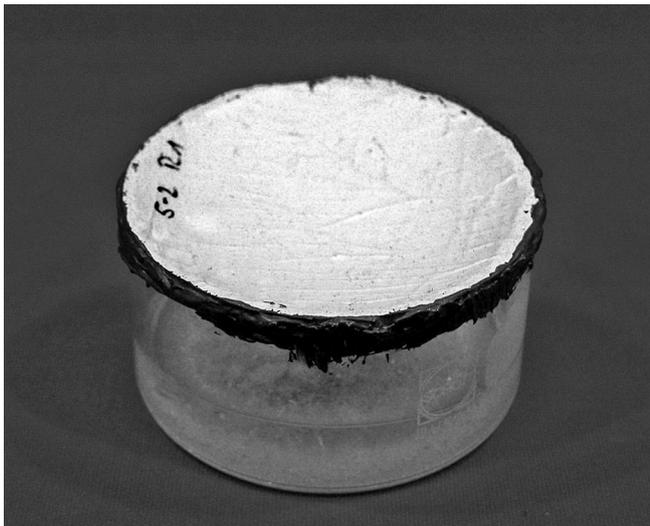


Bild 3-14: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion

Der Diffusionswiderstand der OS-Systeme gegenüber Sulfationen bei Beaufschlagung mit Schwefelsäure kann mit Hilfe des in Bild 3-15 dargestellten Versuchsaufbaus ermittelt werden. Dabei wird die Probe von einer Seite, der Oberfläche des OS-Systems, mit Schwefelsäure beaufschlagt, während an der anderen Seite Wasser ansteht. Über einen definierten Zeitraum wird in bestimmten Zeitabständen die Sulfationenkonzentration (SO_4^{2-}) mit Hilfe der Ionenchromatografie in dem unterhalb der Probe stehenden zweifach destillierten Wasser (Menge: 0,5 l) gemessen. Dazu wird zu jedem Prüftermin die gesamte Wassermenge entnommen. Zur Vermeidung eines hydrostatischen Druckunterschieds zwischen Außen- und Innenzylinder wird das Säurevolumen so gewählt, dass sich die gleiche Füllhöhe im Innen- und Außenzylinder ergibt.

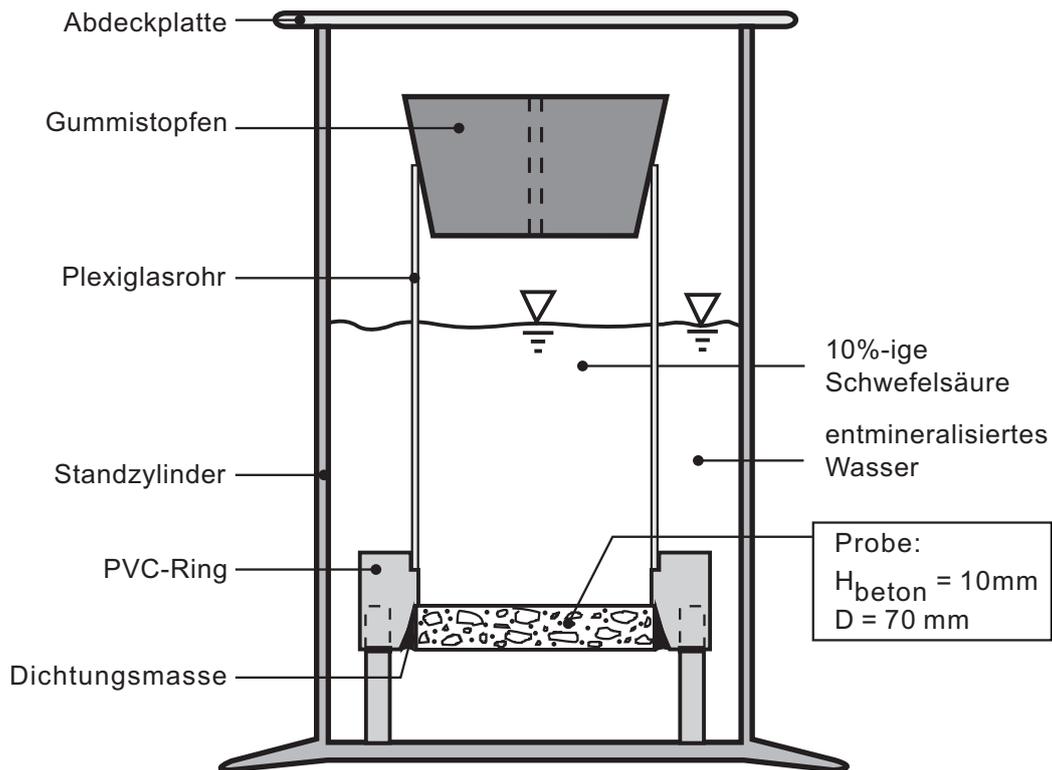


Bild 3–15: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Materialdurchdringung bei Schwefelsäurebeaufschlagung

3.4.4 PRÜFVERFAHREN MIT MECHANISCHER BEANSPRUCHUNG

ZUGVERSUCHE AN DEN MATERIALIEN

Zur Bestimmung von Materialveränderungen hinsichtlich Zugfestigkeit, Dehnung und E-Modul werden im Wesentlichen Zugversuche durchgeführt. Handelt es sich um polymerbasierte Materialien werden zunächst Freie Filme auf mit Teflon beschichteten Glasplatten hergestellt. Aus diesen werden Streifenproben mit einer Länge von 170 mm und einer Breite von 15 mm ausgestanzt und in einer Prüfmaschine bis zum Bruch auf Zug belastet. Die Einspannlänge zwischen den Klemmbanken der Prüfmaschine beträgt 100 mm. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min wird die Last auf den Freien Film aufgebracht, während gleichzeitig mittels Wegaufnehmer die Längenänderung des Films gemessen wird. Die Schichtdicken werden für jede Probe an fünf Messstellen jeweils vor Beginn der Prüfung ermittelt. Bild 3–16, rechts, zeigt die Durchführung des Zugversuchs.

Zementgebundene Oberflächenschutzschichten können ebenfalls anhand von Zugversuchen charakterisiert werden. Sind die Schichten unbewehrt, so können Zugfestigkeit, Dehnung und E-Modul des Mörtels bestimmt werden. Ist das Material bewehrt, kann anhand der Zugversuche auch der Verbund zwischen Bewehrung und Mörtel über die Rissverteilung analysiert werden. Bei den in Bild 3–16, rechts, dargestellten Zugversuchen beträgt die Probenlänge 50 cm, die Breite 10 cm und die Dicke etwa 4 cm. Über induktive Wegaufnehmer wird die Längenänderungen während der Prüfung mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/m erfasst. Die Lasteinleitung erfolgt über aufgeklebte Stahllaschen.

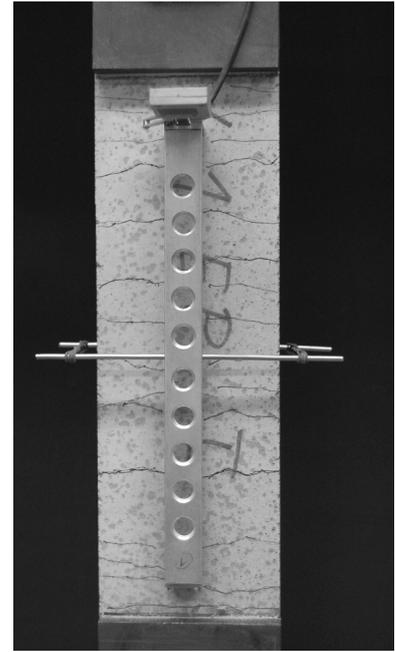
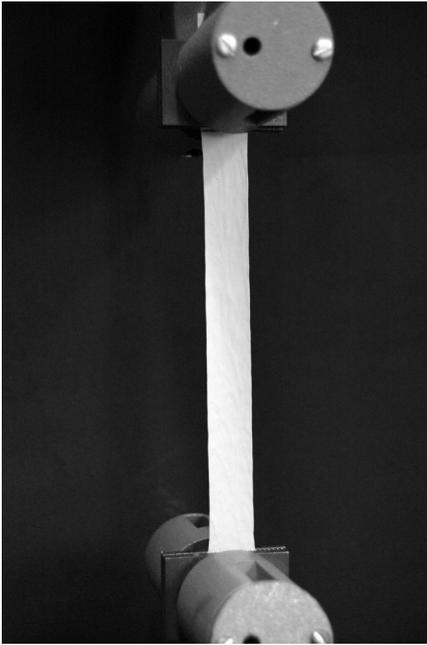


Bild 3–16: Links: Zugversuch an einem freien Film. Rechts: Zugversuch an einer Streifenprobe aus textilbewehrtem Spritzmörtel

HAFTZUGVERSUCHE AN VERBUNDKÖRPERN

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit im Abreißversuch ist in Bild 3–17 schematisch skizziert. Das OS-System wird auf einer Betonplatte aufgebracht. Nach einer definierten Lagerung werden fünf Ringnuten gebohrt, Stempel aufgeklebt und der Abreißversuch durchgeführt. Nach Abschluss des Abreißversuchs wird die Haftzugfestigkeit berechnet und die Versagensart bestimmt. Es gibt folgende Versagensarten:

- A Kohäsionsversagen des Betonsubstrats
- A/B Adhäsionsversagen zwischen Substrat und der ersten Schicht (z. B. Grundierung, Haftschrämme oder Mörtel)
- B Kohäsionsversagen in der ersten Schicht
- B/C Adhäsionsversagen zwischen der ersten und zweiten Schicht
- C Kohäsionsversagen in der zweiten Schicht usw.
- -/Y Adhäsionsversagen zwischen der obersten Schicht und der Klebschicht
- Y Kohäsionsversagen in der Klebschicht
- Y/Z Adhäsionsversagen zwischen der Klebschicht und dem Stempel

Bei einer Kombination der Versagensarten ist die Versagensfläche zu erfassen, um den prozentualen Anteil der Oberfläche je Versagensart zu bestimmen, z. B. A : B = 30 % : 70 %.

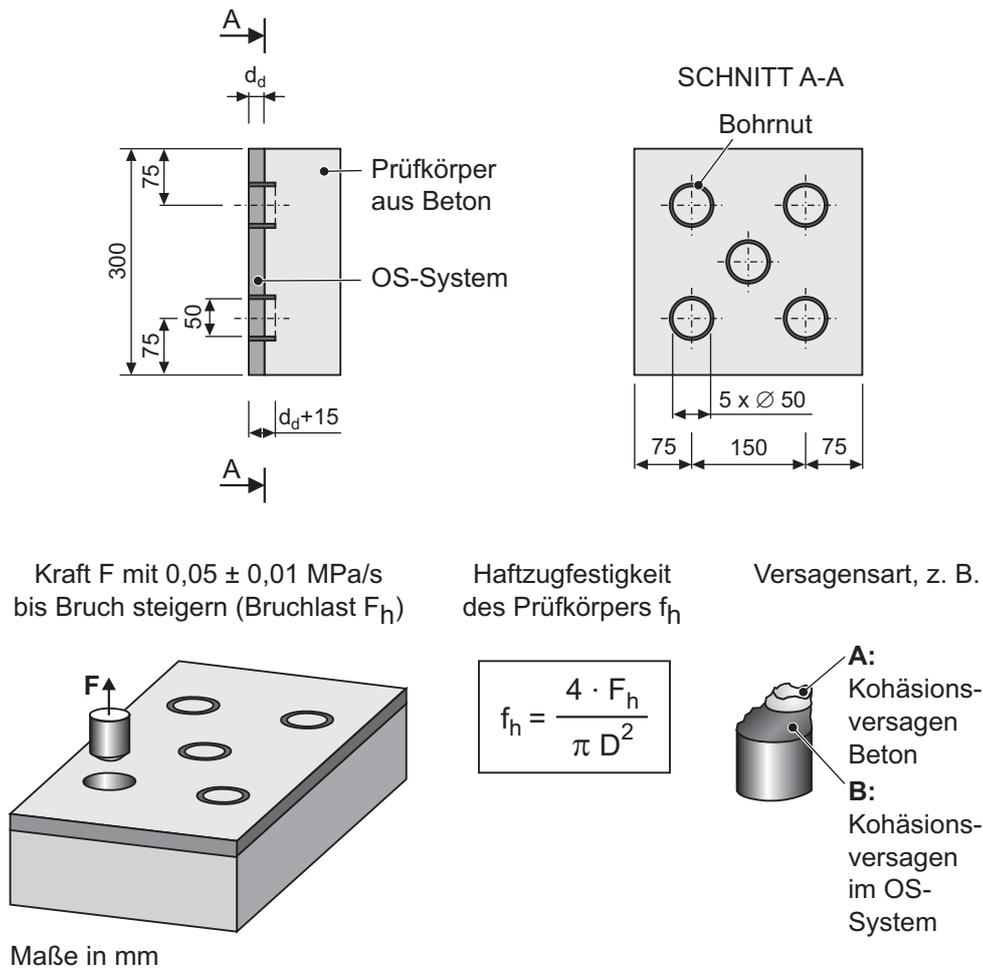


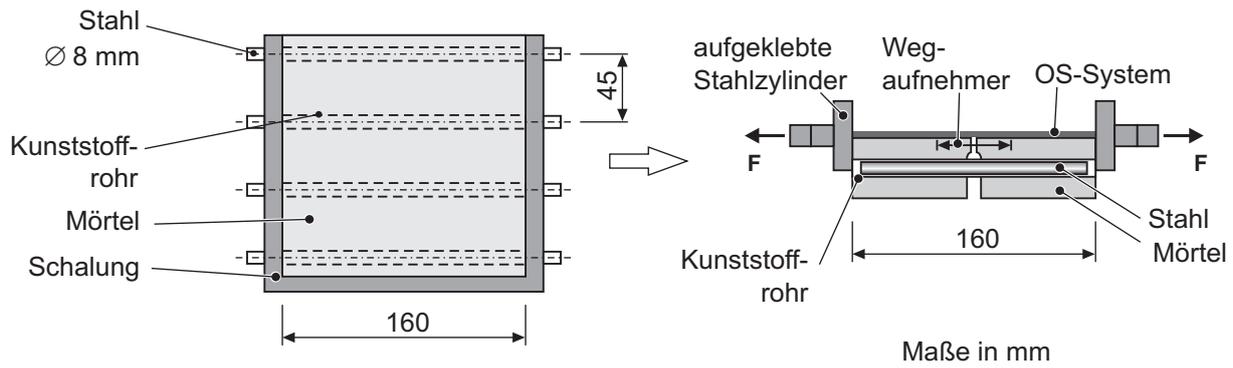
Bild 3-17: Ermittlung der Haftzugfestigkeit auf einer Referenz-Betonplatte

RISSÜBERBRÜCKUNG AN VERBUNDKÖRPERN

Bis zu welchem Maß die auf Mörtel applizierten Oberflächenschutzsysteme vor und nach den Bewitterungen Risse überbrücken können, wird unter anderem mit dem in Bild 3-18 dargestellten Versuchsaufbau untersucht. Nach dem Beschichten des Substrates, wird im Substrat an einer Sollbruchstelle ein definierter Riss (Rissbreite $\leq 100 \mu\text{m}$) erzeugt. Das aufgetragene OS-System wird über dem Riss wie folgt mechanisch belastet:

Verfahren A: Die Rissbreite wird mit definierter Geschwindigkeit (0,05 mm/min oder 0,5 mm/min, je nach zu überbrückender Rissbreite) kontinuierlich aufgeweitet, bis das OS-System reißt oder die geforderte Rissbreite erreicht ist.

Verfahren B: Die Rissbreite ändert sich periodisch innerhalb definierter Grenzen. Die Messung wird beendet, wenn das OS-System reißt oder wenn der dynamische Zyklus abgeschlossen ist.



Probekörper wird nach Applikation des OS-Systems
in 4 Prismen 40 x 40 x 160 mm zersägt

Bild 3-18: Bestimmung der Rissüberbrückung im Zugversuch (Prinzipskizze)

In der DIN EN 1062-7 sind in Abhängigkeit von den Prüfbedingungen Klassen definiert (Tab. 3-12 und Tab. 3-13). Beim Verfahren A wird die jeweilige Klasse durch die Breite des überbrückten Risses und der Geschwindigkeit bestimmt, während im Verfahren B die Frequenz, Zyklanzahl und Rissbewegung in den Klassen definiert wird. Die rissüberbrückenden Eigenschaften können bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt werden. Im Anhang der Norm werden sechs unterschiedliche Versuche angegeben, mit denen die Rissüberbrückungsfähigkeit bestimmt werden kann. Für das Verfahren A gibt es den statischen Zugversuch und den statischen Biegeversuch, während für das Verfahren B drei unterschiedliche dynamische Zugversuche und ein dynamischer Biegeversuch zur Auswahl stehen. Stenner /Ste99/ hat identische Oberflächenschutzsysteme mit unterschiedlichen Prüfverfahren untersucht, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Er hat den statischen Zugversuch C1, den statischen Biegeversuch C2 und zwei dynamische Zugversuche (C3, C5) bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Prüftemperatur verglichen. Diese Versuchsreihe zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Für die nachfolgend erläuterten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurde der in Bild 3-18 skizzierte Versuchsaufbau verwendet.

Tab. 3-12: Klassen und Prüfbedingungen für die kontinuierliche Rissaufweitung (Verfahren A)

Klasse	Breite des rissüberbrückten Risses	Geschwindigkeit
	μm	mm/min
A 1	> 100	- ¹⁾
A 2	> 250	0,05
A 3	> 500	0,05
A 4	> 1250	0,5
A 5	> 2500	0,5

¹⁾ Statischer Zugversuch

Tab. 3-13: Klassen und Prüfbedingungen für die periodische Rissaufweitung (Verfahren B)

Klasse	Prüfbedingungen	
B 1	$w_o = 0,15\text{ mm}$, $w_u = 0,10\text{ mm}$, $n = 100$, $f = 0,03\text{ Hz}$, $w = 0,05\text{ mm}$	Trapezfunktion
B 2	$w_o = 0,15\text{ mm}$, $w_u = 0,10\text{ mm}$, $n = 1000$, $f = 0,03\text{ Hz}$, $w = 0,05\text{ mm}$	Trapezfunktion
B 3.1	$w_o = 0,30\text{ mm}$, $w_u = 0,10\text{ mm}$, $n = 1000$, $f = 0,03\text{ Hz}$, $w = 0,2\text{ mm}$	Trapezfunktion

Klasse	Prüfbedingungen	
B 3.2	Wie 3.1 und $w_L = \pm 0,05$ Sinusfunktion, $n = 20000$, $f = 1$ Hz	
B 4.1	$w_o = 0,50$ mm, $w_u = 0,20$ mm, $n = 1000$, $f = 0,03$ Hz, $w = 0,30$ mm	Trapezfunktion
B 4.2	Wie 4.1 und $w_L = \pm 0,05$ Sinusfunktion, $n = 20000$, $f = 1$ Hz	

Legende: f = Frequenz, n = Anzahl der Zyklen, w = Änderung der Rissbreite, w_L = belastungsabhängige Rissbewegung, w_o = größte Rissbreite, w_u = kleinste Rissbreite

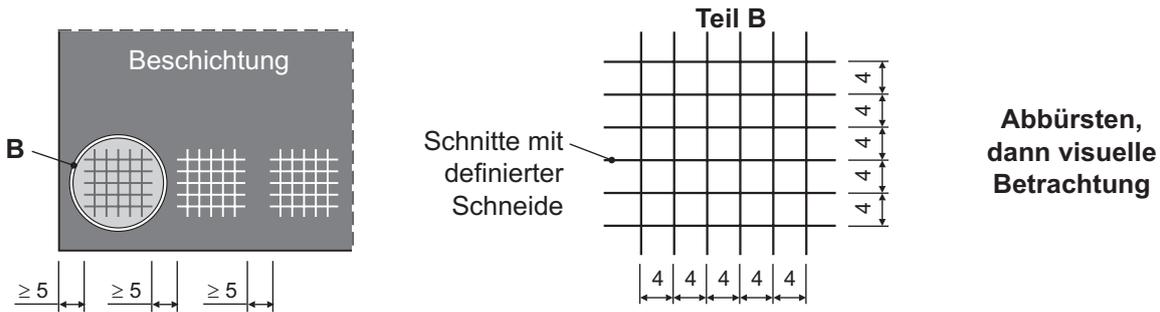
Der erläuterte Versuch ist für OS-Systeme nach RL-SIB ausgelegt. Zur Untersuchung alternativer Schutzsysteme aus Glas und Spritzmörtel ist der Versuchsaufbau zu klein. Die speziell für die Untersuchung dieser Systeme entwickelten Versuchsaufbauten werden im Kapitel 7 erläutert.

3

GITTERSCHNITT

Die Gitterschnittprüfung wird an OS-Systemen mit Gesamtschichtdicken von maximal 250 bis 500 μm durchgeführt. Je höher die Schichtdicke, desto gleichmäßiger sollte die Beschichtung sein. Bei dem Verfahren werden in das OS-System, was sich auf einem Substrat (Betonplatte) befindet, mit einer definierten Schneide Schnitte durch die Beschichtung durchgeführt. Die Schnitte müssen bis zum Substrat reichen. Bild 3–19 zeigt das Vorgehen. Bei harten Beschichtungen ist zusätzlich ein Klebeband auf die Beschichtung aufzubringen und innerhalb von fünf Minuten abzuziehen. Die Schnitte werden bei weichen OS-Systemen (z. B. Polymerdispersionen) unmittelbar nach dem Bürsten und bei harten Materialien (z. B. Epoxidharze) unmittelbar nach dem Abziehen des Klebebandes visuell begutachtet. Die Prüfflächen werden durch Vergleichen mit Bildern, die in der DIN EN ISO 2409 angegeben sind, in sechs Klassen (Gitterschnittkennwert 0 bis 5) eingestuft. Beim Gitterschnittkennwert 0 sind die Schnitttränder vollkommen glatt, keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt. Beim Gitterschnittkennwert 4 hingegen ist die Beschichtung längs der Schnitttränder in breiten Streifen abgeplatzt und/oder einige Quadrate sind ganz oder teilweise abgeplatzt. Die abgeplatzte Fläche ist größer als 50 % aber nicht größer als 60 % der gesamten Gitterschnittfläche. Bei größeren Abplatzungen erfolgt die Einstufung in die Klasse 5.

Variante 1 (weiche Beschichtung)



Variante 2 (harte Beschichtung)

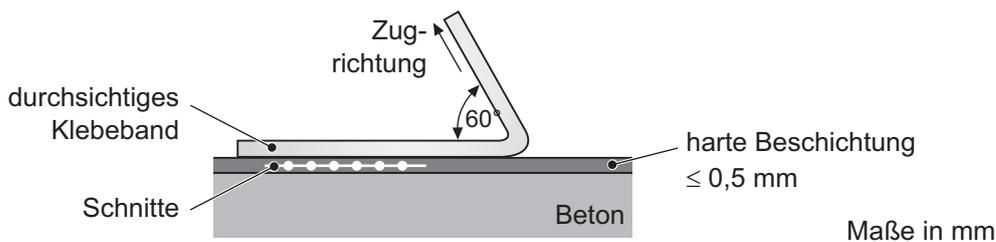


Bild 3–19: Bestimmung des Widerstandes der Beschichtung gegen eine Trennung vom Beton (Prinzipiskizze)

VERSCHLEISSUNTERSUCHUNGEN

Zur Untersuchung des Verschleißes von OS-Systemen gibt es einerseits den in DIN EN ISO 5470-1 genormten Abriebwiderstandstest mit einem Taber-Abriebprüfgerät und andererseits die von Produkt-Formulierern entwickelten Rad-Tests /Zil08/, /Kra09/. Für zementgebundene Systeme wird zudem noch die so genannte Böhme-Scheibe verwendet werden. Zusätzlich werden noch zwei weitere Verfahren eingesetzt, die aus der Prüfung von Estrichmörteln entstammen. Hierbei handelt es sich um die Verschleißprüfung nach BCA, DIN EN 13892-4, und die Verschleißprüfung nach dem „rolling wheel-Verfahren“, DIN EN 13892-5. In /Hup05/ sind die drei Verfahren Taber, BCA und „rolling wheel“ erläutert und auf eine große Bandbreite beschichteter Betonplatten (22 Systeme auf Reaktionsharzbasis) angewendet worden. Die Prüfergebnisse zeigen, dass sich weder eine Korrelation zwischen den einzelnen Verfahren, noch eine Korrelation zu Baustoffparametern herleiten lässt /Hup05/. Dies war eine Motivation für die Entwicklung des Rad-Tests. Nachfolgend werden zunächst die beiden Verfahren Taber und Böhme beschrieben. Danach erfolgt die Erläuterung des Rad-Tests.

Das Taber-Abriebprüfgerät wurde ursprünglich entwickelt, um den Abriebwiderstand von beschichteten Textilien zu bestimmen. Bei diesem Versuch wird eine Probenscheibe (Durchmesser etwa 100 mm) unter Reibrädern eingespannt. Die Reibräder sind mit Schleifkörnern bestückt. Die Probe und die Räder drehen sich. Der dadurch entstandene Abrieb wird alle 100 Zyklen anhand des Masseverlustes bestimmt. Nach DIN EN ISO 5470-1 soll die Beanspruchung 1000 Zyklen mit einer Last von 1000 g betragen, die Drehzahl des Tellers beträgt 72 min^{-1} oder 60 min^{-1} .

Die Schleifscheibe nach Böhme wird nach DIN EN 13892-3 zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von aus Zementestrichmörteln geformten Prüfkörpern verwendet. Das Verfahren ist für Mörtel/Beschichtungen auf Polymerbasis nicht geeignet. Zur Prüfung wird eine Probe mit einer quadratischen Prüffläche von 50 cm^2 auf die mit Schleifmittel (Korund) bestreute, rotierende Schleifbahn des Prüfgerätes aufgesetzt. Mit einer Belastung von 294 N erfolgt die Beanspruchung über 16 Prüfperioden von jeweils 22 Umdrehungen mit einer Drehzahl von 30 min^{-1} . Bei Beginn jeder neuen Prüfperiode wird die Prüffläche der Probe um 90° gedreht und neues Schleifmittel hinzu gegeben. Nach jeweils 0, 4, 8, 12 und 16 Prüfperioden wird der Dickenverlust an neun vor der Prüfung festgelegten Punkten abgelesen und der Massenverlust bestimmt.

Die Belastung von befahrbaren OS-Systemen, insbesondere in Brems-, Beschleunigungs- und Kurvenbereichen, werden mit diesen beiden Prüfmethode jedoch nicht ausreichend simuliert /Zil08/, /Hup04/. Das Stuttgarter Verfahren nach DIN EN 660-1 zur Ermittlung des Verschleißverhaltens der Nutzschiene von Polyvinylchlorid-Bodenbelägen unter Laborbedingungen ist eine Prüfung die eine Walkbewegung ausübt. Das zugrunde liegende Prinzip ist hierbei die Dreh-Schlupfbewegung, die durch das Schuhwerk von Benutzern auf Bodenbelägen ausgeübt wird. Die RL-SIB verlangt für das Stuttgarter Verfahren zwar eine höhere Zyklenzahl als die Norm, dennoch wird die Prüfmethode mit einer Gewichtsbelastung von nur 17 kg den realen Belastungen in Parkbauten ebenfalls wenig gerecht. Somit haben Anbieter von OS-Systemen eine neue Prüfmethode, die speziell den Anforderungen von befahrenen Parkhausbeschichtungen gerecht wird, entwickelt. Die entwickelte Prüfapparatur besteht aus einem handelsüblichen Kfz-Reifen mit einer Gewichtsauflage von 230 kg, der eine zyklische Drehbewegung auf einer beschichteten Betonplatte ausübt /Zil08/. Der Winkel der zyklischen Drehbewegung beträgt 100° , ein Prüfzyklus umfasst die Hin- und Rückbewegung des Reifens. Prüfungen werden mit bis zu 15000 Zyklen ausgeführt. Ggf. erfolgt eine Prüfungsunterbrechung, um eine Erwärmung von Reifen und Beschichtung zu vermeiden. Die Beurteilung der belasteten OS-Systeme erfolgt visuell. Dazu werden die geprüften Systeme in die Kategorien keine Beanstandungen, leichte Abnutzung, mittlere Abnutzung und starke Abnutzung eingeteilt. Eine absolute Aussage über die Nutzungsdauer ist jedoch auch mit dieser Prüfmethode nicht möglich /Zil08/. An einer Quantifizierung

des Abtrags mittels Lasermessungen arbeiten /Hup04/.

3.4.5 PRÜFVERFAHREN ZUR MATERIALANALYSE OHNE MATERIALBEANSPRUCHUNG

Sowohl die visuelle Beurteilung, die Bestimmung von Schichtdicken als auch die chemischen Analysen sind Verfahren bei denen keine Beanspruchung aus Klima, Medien bzw. mechanischer Belastung erfolgt. Diese Prüfverfahren werden vor, während und nach den zuvor dargestellten Materialbeanspruchungen eingesetzt.

VISUELL

Die Charakterisierung von OS-Systemen auf Basis der visuellen Betrachtung ist ein fester Bestandteil bei der Beurteilung von

- Farb-, Glanz-, Helligkeitsänderung
- Zersetzung
- Bewuchs, Ablagerungen
- Materialabtrag
- Adhäsionsverlust
- Blasen und
- Rissen.

Die Methode hat jedoch zwei Nachteile: Der Schaden ist erst in einem weit fortgeschrittenem Stadium visuell detektierbar und eine objektive Beurteilung des Schadens ist nur annähernd über zuvor festgelegte Schadensausprägungen bzw. Schadensbilder möglich. Die Betrachtung von Materialproben unter dem Mikroskop bedingt eine höhere Sensitivität der Methode, erfordert jedoch zunächst eine Probenentnahme und Probenpräparation.

Die Veränderung der Farbe kann durch spektrale Farbmessung beschrieben werden. In DIN EN ISO 11664-4 ist das Verfahren der spektralen Farbmessung unter Verwendung der CIE-Lab-Formel dargestellt.

Bei der Erfassung von Rissen in OS-Systemen kann die Rissbreite, Rissbreitenänderung, Risslänge, der Rissverlauf und der Risszustand in der Draufsicht mit Hilfe von Maßstäben bestimmt werden. Die Beurteilung der Risstiefe und der Anrisse an der dem Beton zugewandten Materialseite kann nur im Probenquerschnitt erfolgen. Dies erfolgt im Allgemeinen mittels Lichtmikroskop. Bild 3-20 zeigt hierzu ein Beispiel. Das Foto wurde mit einer CCD-Kamera aufgenommen, die Rissvermessung erfolgte mit einer entsprechenden Software.

SCHICHTDICKE

Entsprechend den vorangegangenen Erläuterungen sind die Schichtdicken der einzelnen Beschichtungslagen ein wesentlicher Parameter für die Dauerhaftigkeit eines OS-Systems. Zusätzlich können anhand der Schichtdickenbestimmung vor, während und nach einer Beanspruchung Rückschlüsse auf Veränderungen der Schichtdicken gezogen werden. An freien Filmen kann die Schichtdicke mit einer Millitast Messuhr von Mahr bestimmt werden. Bei planen Oberflächen liegen die Abweichungen im Bereich von 5 µm.

Die Schichtdicken von OS-Systemen die auf Betonen appliziert sind können hingegen nur in Probenquerschnitten unter einem Lichtmikroskop vermessen werden. Bild 3–21 zeigt beispielhaft die Ermittlung von Schichtdicken eines mehrschichtigen OS-Systems. Anhand des Bildes wird auch deutlich, dass die Auflösung des Mikroskops im Allgemeinen nicht entscheidend für die Güte des Messwertes der mittleren Schichtdicke ist. Im Wesentlichen wird der Messwert von den Materialunebenheiten bestimmt. Aber auch die Probenpräparation im Querschnitt und die Materialfestigkeiten sowie Materialfarben beeinflussen über die Differenzierbarkeit einzelner Schichten das Ergebnis.

3

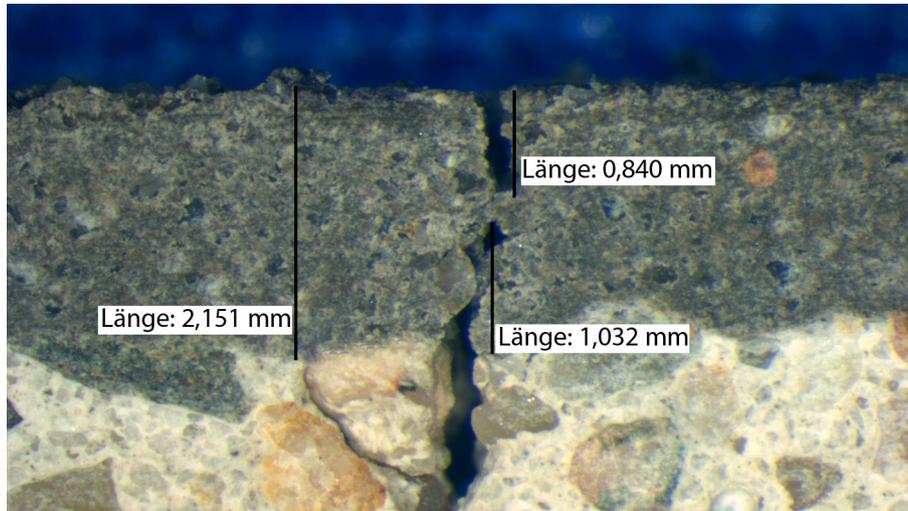


Bild 3–20: Vermessung eines Risses im Probenquerschnitt unter dem Lichtmikroskop

DYNAMISCHE DIFFERENZKALORIMETRIE

Die Charakterisierung von Polymeren erfolgt unter anderem anhand der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC – Differential Scanning Calorimetry). Hierbei wird eine Probe in einem gewählten Temperaturbereich (z. B. -50 °C bis 250 °C) erwärmt und die Differenz der zugeführten Wärmeenergie im Vergleich zu einer thermisch inerten Referenzprobe ermittelt (Wärmefluss in Abhängigkeit von der Temperatur). Wird dieser Versuch an einer Probe mehrmals durchgeführt, so kann über eine Veränderung des Wärmeflussverlaufs in den verschiedenen DSC-Fahrten auf eine Nachvernetzung/ Nachverfilmung geschlussfolgert werden.

ULTRASCHALLREFLEXIONSVERFAHREN

Mittels Ultraschallreflexionsverfahren können mechanische Moduln von Polymerfilmen bestimmt werden /Ali03/, /Oeh05/, /Ali07/. Das am Deutschen Kunststoffinstitut eingesetzte Ultraschallmessverfahren /Ali97/, /Ali00/ beruht auf der Reflexion von Ultraschallwellen an der Grenzfläche zwischen einer Ultraschallverzögerungsstrecke und der Probe. Von einem Ultraschallwandler werden durch Anregung mit einem elektrischen Signal gleichzeitig eine Longitudinalwelle und eine Transversalwelle erzeugt. Beide Wellen breiten sich in einer zylindrischen Verzögerungsstrecke aus, werden an der Grenzfläche zwischen Verzögerungsstrecke und Probe reflektiert und erfahren hierbei jeweils eine Amplitudenänderung und eine Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom Longitudinalwellen- und Schubmodul der Probe. Am Ultraschallwandler werden dann beide reflektierten Wellen wieder in ein elektrisches Signal zurückgewandelt, wobei sie aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten zeitlich getrennt empfangen werden. Das elektrische Signal wird danach digitalisiert und ausgewertet.

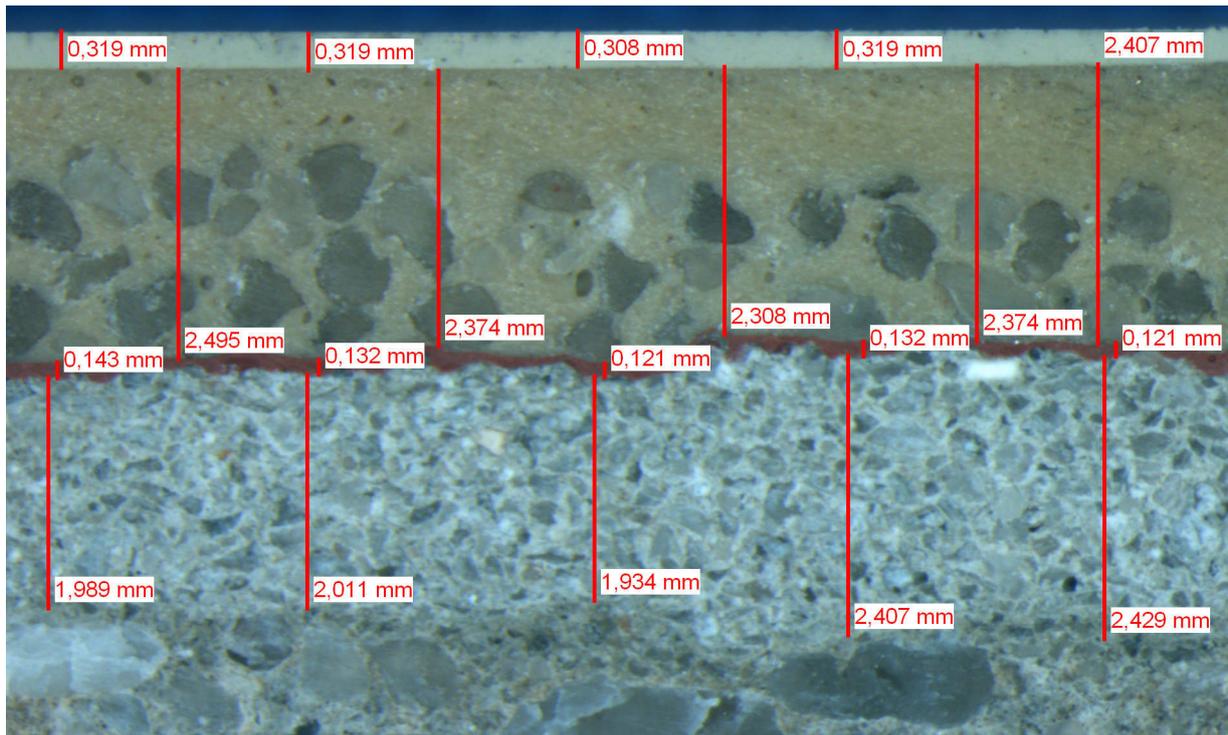


Bild 3–21: Bestimmung der Dicken einzelner Schichten eines OS-Systems unter dem Lichtmikroskop

FTIR-SPEKTROSKOPIE

Chemische Reaktionen sowie physikalische Strukturänderungen (Kristallisationsgrad) von Polymeren können mit der FTIR-Spektroskopie über die Bildung neuer Banden oder das Verschwinden bzw. Verschieben bestehender Banden detektiert werden /Ehr07/, /Lit06/. Mit Hilfe der FT-IR-Mikroskopie können Heterogenitäten in einem Messvolumen eines Polymers betrachtet werden /Sal09/.

KONFOKALE RAMAN-MIKROSKOPIE

Bei der konfokalen Raman-Mikroskopie wird die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie mit der Raman-Spektroskopie kombiniert. Dadurch können Raman-Spektren entlang von Linienscans oder 2-D-Mappings aufgenommen und gleichzeitig die Verteilung einer chemischen Verbindung in der betrachteten Fläche visualisiert werden. Hierzu erfolgt die Beleuchtung der Probe mit einem Laserspot. Das von der Probe zurückgesandte Licht wird ebenfalls nahezu punktförmig auf einen Empfänger abgebildet und dort detektiert. Neben den detektierbaren Fluoreszenzspektren entsteht Ramanlicht, das durch inelastische Streuung des Anregungslichtes von Materialien selbst hervorgerufen wird. Diese Raman-Spektren sind charakteristisch für das jeweilige Material /Bor05/.

4. UNILATERALE NMR ALS ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFMETHODE

4.1 DIE NMR-MOUSE ALS UNILATERALE NMR

4.1.1 NMR MESSPRINZIP

Die Magnetische Kernresonanz (NMR: Nuclear Magnetic Resonance) wird als Messverfahren in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt. Unter anderem in der Chemie als spektroskopisches Verfahren zur Bestimmung chemischer Strukturen, in der Medizin als bildgebendes Verfahren zur Diagnostik und in der Ölindustrie zur Charakterisierung der Gesteinsschichten.

Gemessen wird hierbei die Präzession der Magnetisierung von Atomkernen in einem Magnetfeld. Zu bestimmende Parameter sind die Frequenz der Präzession, die Zeitkonstante T_1 für den Aufbau der Kernmagnetisierung und die Zeitkonstante T_2 für das Ausklingen der Präzessionsbewegung /Blu05a/. Die Präzessionsfrequenz

$$2\pi \cdot \nu_0 = \gamma \cdot B_0$$

Gleichung 4-1

ist proportional zur Magnetfeldstärke B_0 . Dabei ist γ eine für den Atomkern charakteristische Konstante und die Frequenz ν_0 liegt im Bereich von 20 MHz für Permanentmagnete. Diese Permanentmagnete werden für die unilaterale NMR eingesetzt.

Gewöhnlich wird die Magnetisierung von Protonen (Atomkerne des Wasserstoffatoms) gemessen, da Protonen die höchste Messempfindlichkeit aufweisen und sowohl in Wasser wie in organischen Materialien in großer Anzahl vorkommen. Die zu messende Probe sollte nicht elektrisch leitfähig sein, damit die elektromagnetischen Felder nicht durch die Probe selbst abgeschirmt werden. Magnetische Gegenstände in Probennähe können eine Verzerrung des Magnetfeldes hervorrufen.

Der Messvorgang besteht im Wesentlichen im Aussenden eines Hochfrequenzimpulses und dem Messen der Impulsantwort. Die Antwort ist im einfachsten Fall eine gedämpfte Schwingung mit der Frequenz ν_0 , die mit der Zeitkonstanten T_2 exponentiell abklingt. Für harte Polymere werden im Allgemeinen kurze Werte von T_2 im Bereich um 10^{-5} s und für Wasser Werte von mehr als 1 s gemessen. Es gilt: harte Materialien haben ein kurzes T_2 , weiche ein langes T_2 . Der Aufbau der Kernmagnetisierung T_1 liegt im Bereich von 10^{-2} bis 1 s. Die Anfangsamplitude der Schwingung ist proportional zur Zahl der Protonen und damit zur Materialdichte und in guter Näherung proportional zur Magnetfeld-

stärke, die die Kernmagnetisierung erzeugt /Blu05a/.

Sowohl die Relaxationszeit T_1 als auch die Relaxationszeit T_2 sind in Magnetfeldern geringer Homogenität messbar, die mit einfachen Permanentmagneten erzeugt werden. Dies hat zur Entwicklung von Streufeld-NMR-Sensoren geführt, bei denen die Probe nicht im Innern eines Magneten platziert wird, sondern außerhalb des Magneten /Blu05a/. In Anbetracht dieser Messgeometrie wird die Streufeld-NMR auch als unilaterale NMR bezeichnet.

4.1.2 NMR-MOUSE

Die am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen entwickelte NMR-MOUSE® ist ein handlicher Magnet, der mit einer Spule versehen ist, um NMR-Messungen im Streufeld des Magneten durchzuführen. Sie besteht aus vier Permanentmagneten, die über ein Eisenjoch an der Unterseite magnetisch kurzgeschlossen sind (Bild 4–1). Zwei Magnete werden Richtung y und zwei Magnete Richtung $-y$ polarisiert, um das Magnetfeld B_0 oberhalb der Magneten, parallel zur Sensoroberfläche zu erzeugen. Mittels einer Hochfrequenzspule (HF-Spule), die mittig zwischen den vier Permanentmagneten angeordnet ist, erfolgt die Bestrahlung mit einem Magnetfeld B_1 mit Radiofrequenz /Per05/.

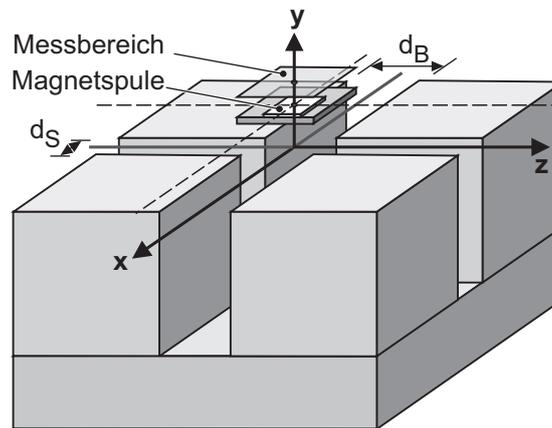


Bild 4–1: Magnetgeometrie und Messbereich der NMR-MOUSE /Orl08a/

In dem Volumenbereich, in dem das Magnetfeld der Magneten und das der Spule senkrecht zueinander stehen sind die NMR-Bedingungen erfüllt, d. h. die Präzession der Magnetisierung von Protonen ist messbar. Dieser Volumenbereich wird als sensitives Volumen bezeichnet (Bild 4–2). Das sensitive Volumen liegt in einem festen Abstand parallel zur Stirnfläche der Magneten. Dieser Abstand beträgt je nach Bauart der NMR-MOUSE 2 bis 30 mm. Während die Länge und Breite des sensitiven Volumens mit dem NMR-MOUSE-Typ festgelegt ist, kann die Dicke des sensitiven Volumens entsprechend der Messaufgaben variiert werden. Tab. 4–1 zeigt die Bezeichnung und Spezifikation der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten NMR-MOUSE-Typen. Je größer der Abstand zwischen sensitivem Volumen und Magneten, also je größer die Messtiefe, umso geringer muss der Gradient sein, umso größer und schwerer werden die Permanentmagneten. Die PM 25, die ein Gewicht von rund 25 kg aufweist, liegt somit zurzeit im Grenzbereich der Anwendbarkeit auf Baustellen.

Durch Verändern des Abstandes zwischen Sensor und Probe kann das sensitive Volumen durch die Probe gefahren werden um ein Tiefenprofil zu erhalten. Die Abstandsänderung erfolgt mit einer schrittmotorgesteuerten Positionierungseinheit. Die maximale Ortsauflösung (d. h. die minimale Schrittweite des Schrittmotors) des Tiefenprofils liegt in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$ /Per05/. Bild

4-3 zeigt eine schematische Übersicht über die Versuchsanordnung im Labor. Die NMR-MOUSE PM 5 mit den Abmessungen 13 x 10 x 8 cm³ und einem Gewicht von rund 1,5 kg befindet sich auf einem Lift, der mittels des Schrittmotors bewegt wird. Die zu untersuchende Probe liegt auf einem feststehenden Tisch oberhalb der NMR-MOUSE, planparallel zum Sensor. Für die PM 25 sieht der Versuchsaufbau identisch aus, nur die Abmessungen sind größer (PM 25: 24 x 24 x 10 cm³).

Tab. 4-1: Bezeichnung und Spezifikation der verwendeten NMR-MOUSE-Typen

Bezeichnung	Frequenz	Gradient	Maximale Messtiefe	Breite Länge Dicke/Auflösung des sensitiven Volumens		
				µm		
-	MHz	T/m	mm			
PM 5	18,15	20	5	20	20	10 bis 200
PM 25	13	8	25	30	30	100 bis 200

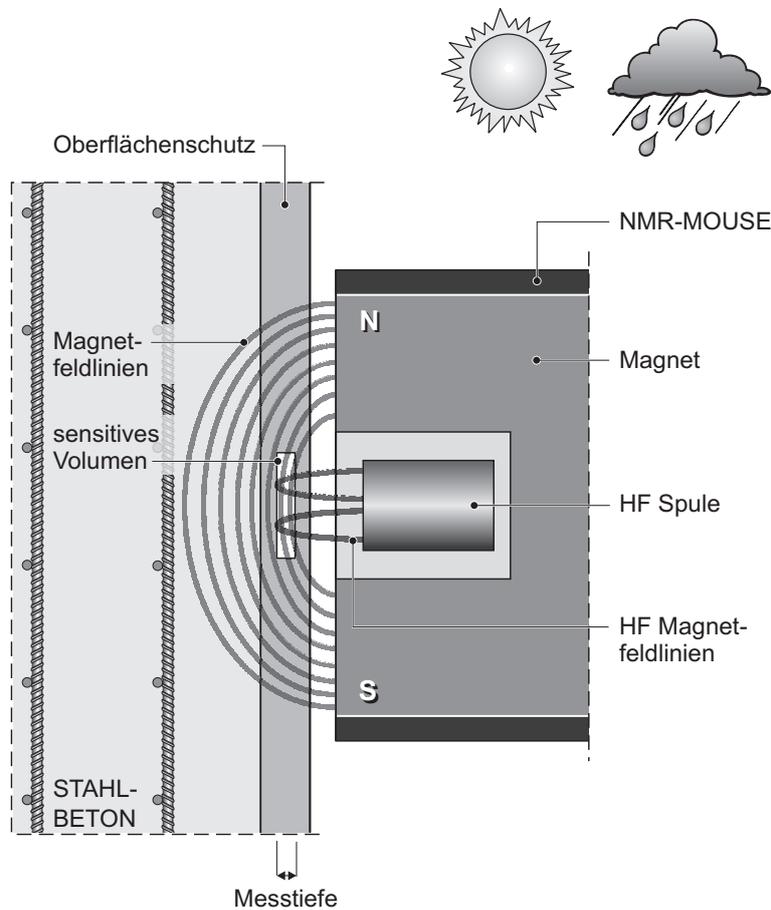


Bild 4-2: Einsatz der NMR-MOUSE am Bauwerk. Die Messung erfolgt innerhalb des sensitiven Volumens, in dem sich die Magnetfeldlinien des Magneten und der Spule kreuzen

Im Gegensatz zu konventionellen NMR-Geräten können mit der NMR-MOUSE beliebig große Objekte zerstörungsfrei untersucht werden. Auch wenn die direkte Ermittlung der chemischen Struktur des Materials durch die chemische Verschiebung erschwert ist, ist die Messung von NMR-Relaxationszeiten und Transportphänomenen möglich /Blu08b/.

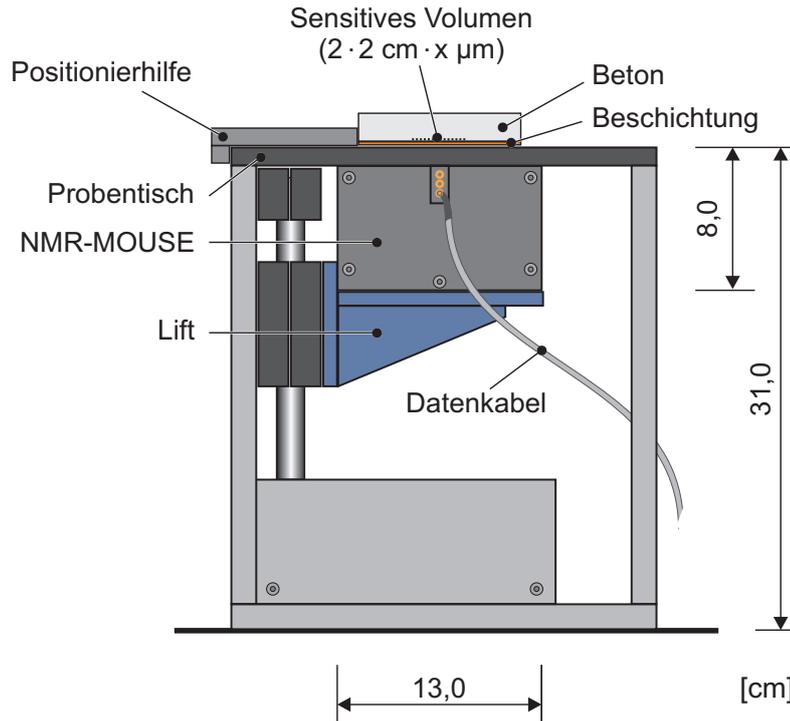


Bild 4–3: Schematische Darstellung der Profil NMR-MOUSE PM 5 mit Lift sowie des sensitiven Volumens in der Probe

4.1.3 MESSWERTE – RELAXATIONSZEITEN T_1 UND T_2

Zur Materialcharakterisierung mittels NMR-MOUSE können näherungsweise die Relaxationszeiten T_1 und T_2 sowie die Protonenintensität bestimmt werden. Zur Ermittlung der „wahren“ Relaxationszeiten T_1 und T_2 ist ein homogenes Magnetfeld erforderlich.

T_2 ist die Zeitkonstante für den Zerfall der Impulsantwort in einem homogenen Magnetfeld. In inhomogenen Magnetfeldern, wie das der NMR-MOUSE, ist T_2 näherungsweise bestimmbar, indem statt eines einfachen Hochfrequenzimpulses viele Hochfrequenzimpulse als Anregung dienen. Die Folge der Hochfrequenzimpulse ist so zu gestalten, dass mittig zwischen den Impulsen ein starkes Messsignal, ein so genanntes Echo erscheint. Die Einhüllende der Echomaxima entspricht in guter Näherung der Einhüllenden der im homogenen Magnetfeld gemessenen Impulsantwort. Die Auswertung der Echoeinhüllenden anhand einer Exponentialfunktion führt zum T_2 (Bild 4–4). Das Messverfahren geht auf Carr, Purcell, Meiboom und Gill zurück /*Blu08b*/. Daher wird es als CPMG-Verfahren bezeichnet. Häufig wird zur Differenzierung die mittels CPMG-Impulsfolge ermittelte T_2 als $T_{2\text{eff}}$ bezeichnet. Hierauf wird im nachfolgenden verzichtet, die angegebenen T_2 Relaxationszeiten wurden immer mittels CPMG-Impulsfolge ermittelt.

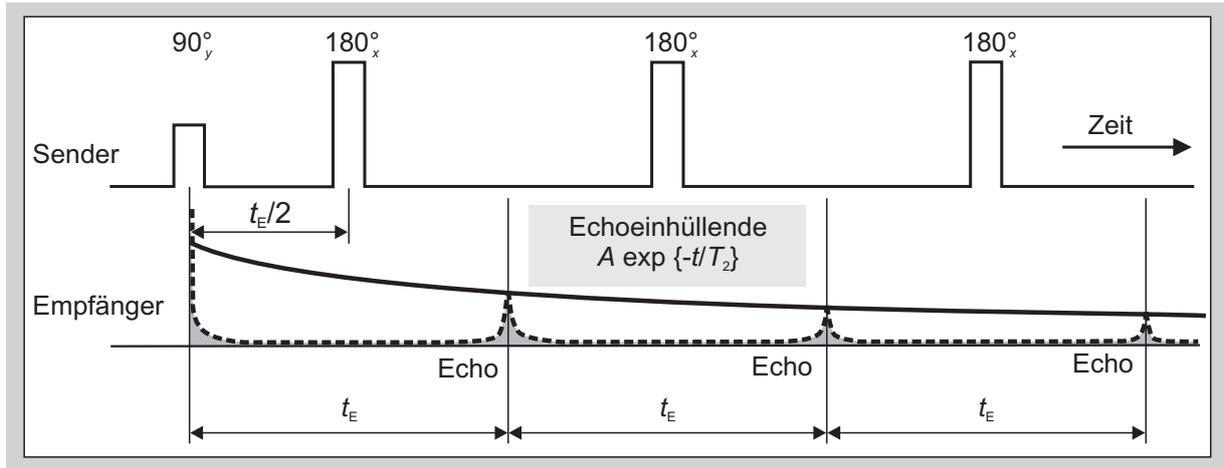


Bild 4-4: CPMG-Sequenz zur Messung der T_2 -Relaxation. Die Einhüllende der Echos ist das Messsignal, das über eine Anpassung mit einer Modellfunktion ausgewertet wird. Die Zeitkonstante des Signalzerfalls wird mit T_2 bezeichnet. Sie charakterisiert die Beweglichkeit der Protonen in der Probe. Die Signalamplitude A ist proportional zur Protonendichte im sensitiven Volumen /Blu05a/.

Die Relaxationszeit T_1 ist die charakteristische Zeitkonstante bei der Annahme eines exponentiellen Aufbaus der thermodynamischen Gleichgewichtsmagnetisierung. Die Magnetisierung baut sich im einfachsten Fall mit der in Gleichung 4-2 dargestellten Funktion auf /Coa99/.

In Gleichung 4-2 ist t die Zeit in der die Protonen dem Magnetfeld B_0 ausgesetzt sind, $M_z(t)$ die Magnetisierung zurzeit t , wenn das Magnetfeld B_0 entlang der z -Achse ausgerichtet ist und M_0 die endgültige, maximale Magnetisierung im vorhandenen Magnetfeld.

$$\frac{M_z(t)}{M_0} = \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T_1} \right)} \right)$$

Gleichung 4-2

Nach Gleichung 4-3 baut sich in der Zeit RD (repetition duration) die Magnetisierung somit wieder zu etwa 99 % auf. T_1 wird entweder mit der „Inversion-Recovery“-Methode oder mit der „Saturation-Recovery“-Methode bestimmt. Ohne Vorkenntnisse der Probe liefert die „Saturation-Recovery“-Methode das zuverlässigere Messergebnis und wird daher bevorzugt verwendet (Bild 4-5). Bei dieser wird die Kernmagnetisierung zu Anfang der Messung während einer Präparationszeit mit einer Reihe von 90° -Impulsen zerstört /Blu08a/.

$$RD \approx 5 \cdot T_1$$

Gleichung 4-3

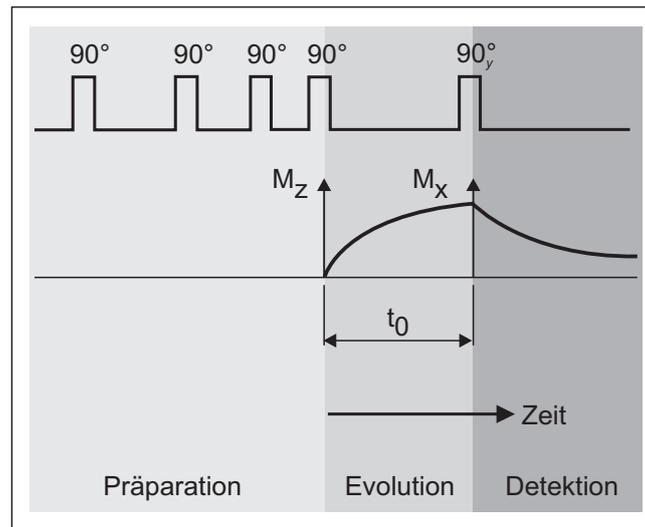


Bild 4–5: „Saturation-Recovery“-Methode zur Bestimmung der Relaxationszeit T_1 . Die Messung wird mehrfach für verschiedene Werte von t_0 wiederholt. Den Wert von T_1 erhält man durch Anpassung der Echoeinhüllenden als Funktion von t_0 mit einer Modellfunktion /Blu05a/.

Wichtige Parameter für die Messung sind die so genannten Drehwinkel der Impulse, die auch als Bezeichnung für die Impulse verwendet werden. Der Drehwinkel gibt an, um welchen Winkel ein Impuls die Kernmagnetisierung um die Achse des hochfrequenten Magnetfeldes der Spule auslenkt. Bei der CPMG-Impulsfolge ist der erste Impuls ein 90° -Impuls, alle weiteren sind 180° -Impulse. Dieser Winkel wird durch die Impulsamplitude und die Impulsdauer eingestellt. 180° -Impulse haben genau die doppelte Dauer der 90° -Impulse. Die Impulsdauer wird gewöhnlich so kurz wie möglich gewählt, damit ein breiter Frequenzbereich angeregt werden kann. Typische Impulsdauern liegen im Bereich weniger Mikrosekunden. Je weiter das sensitive Volumen jedoch vom Magneten entfernt ist, umso länger werden die erforderlichen Impulsdauern. Die Phase der Impulse wird durch die tief gestellten Indizes am Drehwinkel angegeben (Bild 4–4). Die Phase gibt die Richtung der Drehachse des Impulses an. Diese liegt gewöhnlich in der xy -Ebene. Die hier wichtigen Phasen werden mit den vier Richtungen x , y , $-x$, $-y$ bezeichnet. Wichtig ist, dass die Phase des ersten Impulses gegenüber der Phase aller folgenden Impulse um 90° verschoben ist /Blu05a/.

Ein weiterer, entscheidender Parameter ist der Abstand der Impulse. Er wird als Echozeit t_E bezeichnet (Bild 4–4). Zwischen dem ersten und dem zweiten Impuls vergeht die halbe Echozeit, alle weiteren Impulse folgen im Abstand der Echozeit. Die Echozeit wird so kurz wie möglich gehalten, um möglichst viele Echos messen zu können. Begrenzt wird sie durch die Totzeit des Sensors, im Allgemeinen ist t_E größer als 30 Mikrosekunden. Weiterhin ist die Zahl NE der zu messenden Echos festzulegen. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird die Messung mehrmals wiederholt und die Messdaten werden gemittelt. Zwischen den Wiederholungen muss die Zeit RD gewartet werden, damit die Kernmagnetisierung nach der vorangegangenen Störung wieder in das thermodynamische Gleichgewicht gelangen kann.

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurden entsprechend des Materials und der zu untersuchenden Materialcharakteristika die Pulsdauer (P_1), die Echozeit (t_E), die Anzahl an Echos (NE), die repetition duration (RD), die Anzahl an Scans (NS) und die Signalverstärkung (VS) variiert.

4.1.4 DATENANALYSE

Die mit der CPMG-Sequenz gemessene Echoeinhüllende $s(t)$ wird entweder

- über eine Anpassung mit einer Modellfunktion ausgewertet (1.),
- durch Integration zu einem Parameter komprimiert (2.)
- oder über eine inverse Laplace-Transformation in eine Verteilung von Relaxationszeiten konvertiert (3.),

Zu 1.

Im Idealfall erwartet man für den Signalzerfall in Flüssigkeiten eine einfache Exponentialfunktion. Im Gegensatz zu Flüssigkeiten wird der Signalzerfall in Festkörpern durch die magnetische Dipol-Dipol-Kopplung benachbarter Kernspins mitbestimmt. Je nach Abstand der koppelnden Kerne und je nach Zeitskala und Geometrie der betreffenden chemischen Gruppen im Molekül ist diese Dipol-Dipol-Kopplung unterschiedlich stark ausgeprägt. Für den Signalzerfall in Festkörpern erwartet man daher keine reine Exponentialfunktion sondern Funktionen mit einem Gauß-Anteil, der je nach Art des Materials unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Eine für den praktischen Einsatz brauchbare allgemeingültige Theorie gibt es nicht. Daher verwendet man zur Analyse empirische Anpassungsfunktionen. Dies können sein: eine einfache Exponentialfunktion, die Summe zweier Exponentialfunktionen oder eine skalierte gestreckte Exponentialfunktion */Blu08b/*.

Die Bi-Exponentialfunktion

$$s(t) = A_{\text{short}} \cdot e^{\left(\frac{-t}{T_{2,\text{short}}}\right)} + A_{\text{long}} \cdot e^{\left(\frac{-t}{T_{2,\text{long}}}\right)} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

eignet sich zur Beschreibung eines schnellen (short) Relaxationsprozesses und eines langsamen (long) Relaxationsprozesses. Anpassungsparameter sind die

$$\text{relative Amplitude} = \frac{A_{\text{short}}}{A_{\text{short}} + A_{\text{long}}} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

und die Relaxationszeiten $T_{2,\text{short}}$ und $T_{2,\text{long}}$. Die Protonendichte korreliert mit der Gesamtamplitude $A_{\text{short}} + A_{\text{long}}$.

Die skalierte, gestreckte Exponentialfunktion interpoliert zwischen einer reinen Exponentialfunktion ($b = 1$) und einer Gauß-Funktion ($b = 2$) */Blu08b/* (Gleichung 4-6). Hierbei ist A_0 die Gesamtamplitude und T_2 die Relaxationszeit.

$$s(t) = A_0 \cdot e^{\left(\frac{1}{b} \left(\frac{-t}{T_2}\right)^b\right)} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Häufig liefert die skaliert, gestreckte Exponentialfunktion eine qualitativ gleichwertige Anpassung wie die Bi-Exponentialfunktion. Das heißt, experimentelle Daten können sowohl mit der einen als auch mit der anderen Funktion parametrisiert werden. Die skaliert, gestreckte Exponentialfunktion erfordert jedoch einen Anpassungsparameter weniger als die Bi-Exponentialfunktion. Außerdem behält die Relaxationszeit T_2 in Gleichung 4-6 ihre Bedeutung als charakteristische Zeit, in der das Messsignal zerfällt, da mit dem Parameter b nur die Form der Zerfallskurve bestimmt und die Zeitskala der Anpassungsfunktion nicht gestreckt wird (Bild 4-6, b). Eine Deutung des Signalzerfalls im Sinne von zwei oder mehr Prozessen über die Anpassungsparameter bietet sich bei der skaliert, gestreckten

Exponentialfunktion im Gegensatz zur Bi-Exponentialfunktion jedoch nicht an */Blu08b/*.

Zu 2.

Alternativ zur Anpassung mit einer Modellfunktion kann der Kontrastparameter w aus dem Signalzerfall $s(t)$ berechnet werden. Der Parameter ist der Quotient aus dem Integral A über die Einhüllende $s(t)$ der gemessenen ersten Echos und dem Integral B über die Einhüllende der verbleibenden Echos (Gleichung 4-7), (Bild 4-6, a) */Blu08b/*.

$$w = \frac{A}{B} = \frac{\int_0^{t_1} s(t) \cdot dt}{\int_{t_1}^{t_2} s(t) \cdot dt}$$

Gleichung 4-7

4

Betrachtet man nur das Integral A und begrenzt die gemessenen ersten Echos auf ein aussagekräftiges Minimum, können Rückschlüsse auf die Protonendichte gezogen werden. Die Protonendichte korreliert zwar mit der Gesamtamplitude, zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird jedoch im nachfolgenden das Integral A für Aussagen zur relativen Protonenverteilung verwendet. Anhand des Liftes wird dazu in mehreren Tiefen der Probe das Integral A über die Einhüllende $s(t)$ der gemessenen ersten Echos berechnet. Die so berechneten Intensitäten werden in den nachfolgenden Diagrammen über die Probentiefe aufgetragen. Hierbei befindet sich die Probenoberfläche immer in einer Messtiefe von 0 mm.

Zu 3.

Anhand einer inversen Laplace-Transformation der CPMG-Daten kann die Relaxationszeitverteilung berechnet werden (Bild 4-6, c). Die Relaxationszeitverteilung ermöglicht Aussagen zur Mobilität der Protonen. Zerfällt das Signal schneller, kürzere Relaxationszeit, ist dieser Teil der Protonen in ihrer Beweglichkeit stärker eingeschränkt als die Protonen mit einer längeren Relaxationszeit. In porösen Medien, wie z. B. Beton, Naturstein, können darüber vergleichende Aussagen zur Porenverteilung gezogen werden */Sha03/*. Schlussfolgerungen hinsichtlich der Porengrößen sind jedoch nur eingeschränkt, z. B. bei wassergesättigten Bodengesteinen */Coa99/*, möglich. Die inverse Laplace-Transformation kann mittels eines in Matlab geschriebenen Programms durchgeführt */God05/* werden.

Bild 4-6 stellt die drei Methoden zur Auswertung der NMR-Signalzerfallskurven gegenüber. Im Bild a) sind die experimentell mittels CPMG-Sequenz ermittelten Daten eines Naturkautschuks schwarz dargestellt. Die Anpassungsfunktion ist grau und es wurden partielle Integrale in den Bereichen A und B gebildet. Anhand dieser kann die Wichtungsfunktion w berechnet werden. Im Bild b) ist der Verlauf der skalierten, gestreckten Exponentialfunktion für verschiedene Exponenten b dargestellt. Der Exponent b verändert zwar die Form aber nicht die Zeitskala der Funktion. Bild c) zeigt exemplarisch eine mittels inverser Laplace-Transformation berechnete Relaxationszeitverteilung.

Die Relaxationszeit T_1 wurde im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen nur zur Bestimmung der repetition duration RD (Gleichung 4-3) zwischen aufeinander folgenden Impulssequenzen herangezogen. In Abschnitt 4.1.3 wurde die Ermittlung von T_1 beschrieben, eine weitergehende Analyse dieser Daten erfolgte nicht.

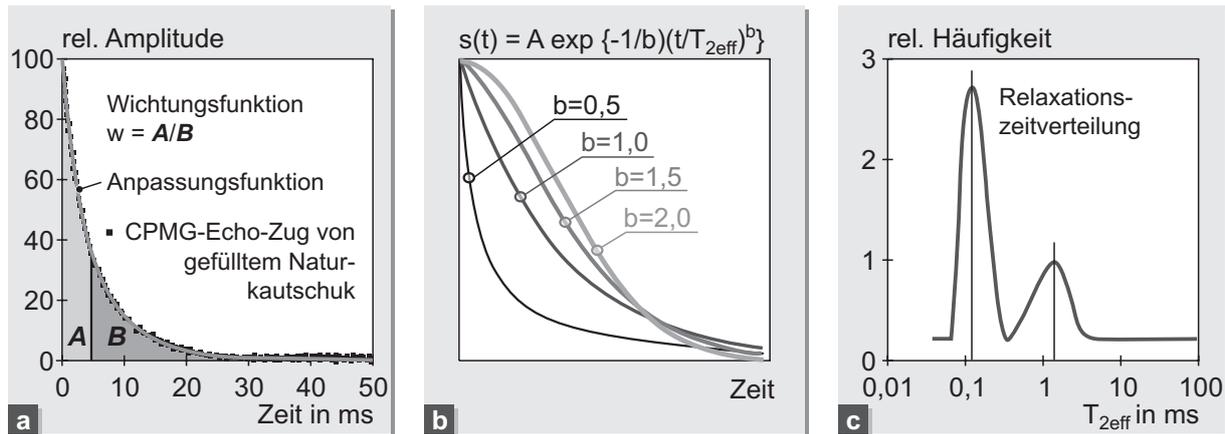


Bild 4-6: Möglichkeiten der Auswertung der aus einer CPMG-Impulsfolge resultierenden NMR-Signalzerfallskurve /Blu05a/

4.2 EINFLUSS DER BETONSTAHLBEWEHRUNG

4.2.1 ALLGEMEINES

Mit der beschriebenen unilateralen NMR-Messtechnik ist es vorstellbar

- die Dicken der Schichten eines Oberflächenschutzsystems,
- das Eindringen von Wasser in ein Oberflächenschutzsystem,
- das Austrocknen des Betons nach der Applikation eines Oberflächenschutzsystems sowie
- Materialveränderungen

zukünftig am Bauwerk zerstörungsfrei und großflächig zu bestimmen.

Hierzu sind jedoch Kenntnisse zum Einfluss der Stahlbewehrung auf die Messungen unabdingbar. Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen und Ergebnisse zum Einfluss der Betonstahlbewehrung auf das NMR-Messsignal wurden in /Orl12/ veröffentlicht. Voruntersuchungen zu dieser Veröffentlichung ergaben, dass die Relaxationszeiten T_1 und T_2 nicht signifikant durch die Stahlbewehrung beeinflusst werden.

4.2.2 VERSUCHSAUFBAU UND UNTERSUCHTE PARAMETER

Die große Bandbreite der Parameter die Einfluss auf das NMR-Signal haben können, erforderte einen gegenüber beschichteten Betonplatten vereinfachten Versuchsaufbau. Anstelle einer mehrlagigen Beschichtung wurde ein Sandwichelement, bestehend aus einer Glasscheibe, Kupfersulfatlösung oder Polyurethan und einer weiteren Glasscheibe, verwendet. Die Glasscheiben waren 1 mm dick, während die Zwischenschicht, bestehend aus Kupfersulfatlösung oder Polyurethan, eine Dicke von rund 1,1 mm aufwies. Die Stahlbewehrung wurde mit Hilfe eines Rahmens aus Polyethylen mit 48 Bohrlöchern in definierten Abständen positioniert. Das Sandwichelement und der Bewehrungsrah-

men befinden sich auf dem Proben­tisch der NMR-MOUSE. Das Sandwichelement und der Rahmen sind in Bild 4–7 dargestellt, die Anordnung der NMR-MOUSE zum Proben­tisch kann Bild 4–3 entnommen werden.

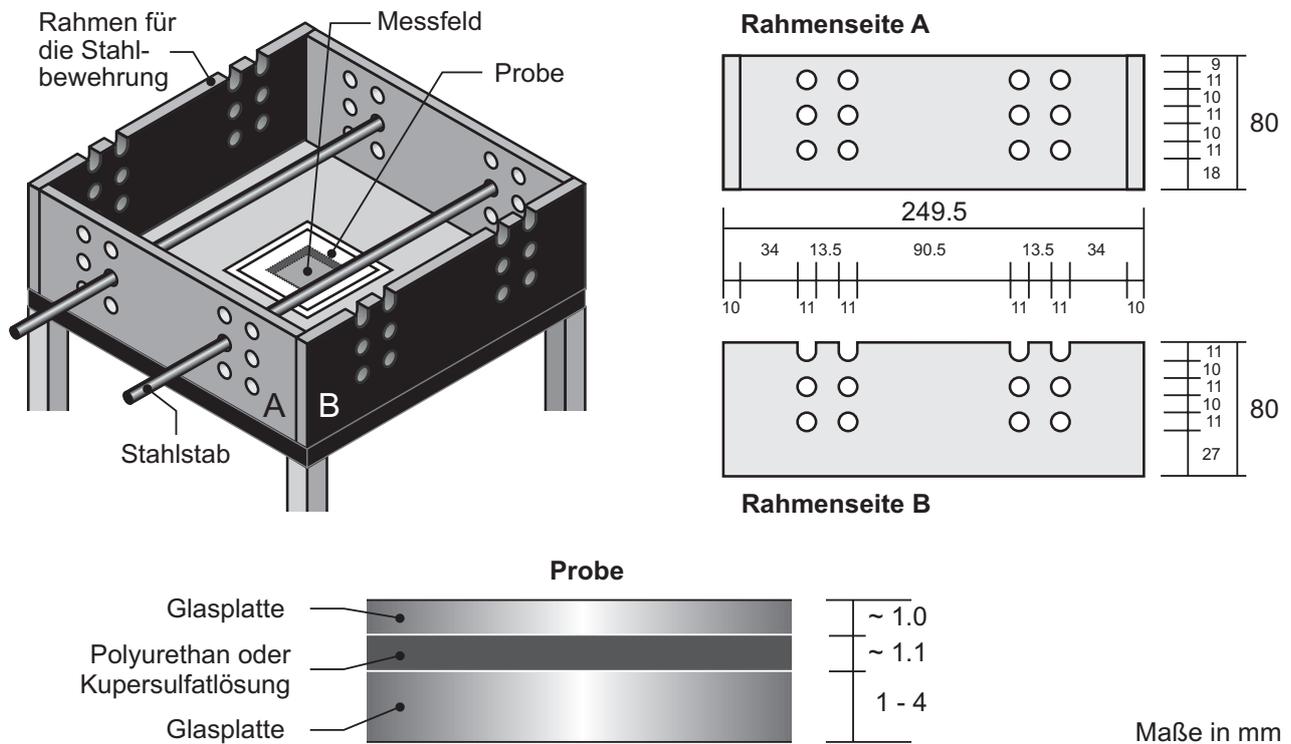


Bild 4–7: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Bewehrungseinflusses auf das NMR-Signal

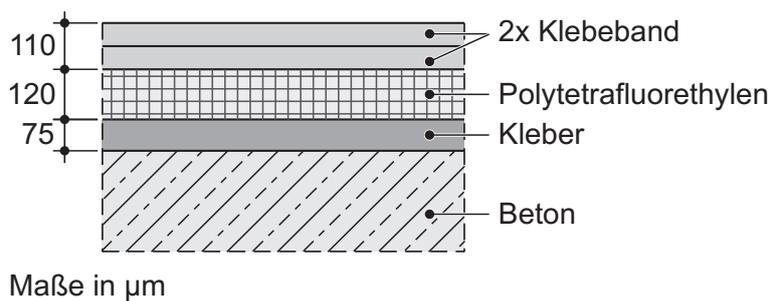
In Tab. 4–2 sind die untersuchten Parameter zusammengefasst. Der Abstand zwischen Stahlbewehrung und Proben­tisch bildet die Betondeckung bei einem Stahlbetonbauteil ab. So wurden Betondeckungen von näherungsweise 2, 3, 4, 5, 6 und 7 cm simuliert. Der Durchmesser der Stahlstäbe betrug 6, 8 oder 10 mm. Der Abstand der Mittellinien zweier Stahlstäbe konnte anhand der Bohrlöcher im Rahmen mit etwa 10, 12,5 oder 15 cm variiert werden. Es wurden Messungen mit 2 oder 4 Stahlstäben durchgeführt. Die 4 Stahlstäbe wurden senkrecht zueinander angeordnet, um einen Ausschnitt aus einer Bewehrungsmatte nachzubilden. Das Messfeld befand sich immer mittig zwischen den Stahlstäben. Sowohl Edelstähle als auch Bewehrungsstähle wurden untersucht. Bei den Messungen mit 2 Stahlstäben erfolgte die Anordnung entweder in 0° oder 90° Richtung zu den Magnetfeldlinien. Die Magnetfeldlinien sind in Bild 4–2 dargestellt: In 0° -Richtung verläuft der Stahl parallel, in 90° -Richtung senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Zusätzlich wurde die Dicke der unteren Glasplatte zwischen 1 und 4 mm variiert, um zu überprüfen, ob die Position des sensitiven Volumens innerhalb der Probe ebenfalls einen Einfluss auf das Messsignal hat. Ist die untere Glasplatte z. B. 4 mm dick und liegt das sensitive Volumen mittig in der Kupersulfatlösung, so verringert sich der Abstand zwischen Bewehrung und sensitivem Volumen um rund 4,5 mm. Bei einer unteren Glasplatte von 1 mm Dicke, ist dieser Abstand hingegen 3 mm größer. Zusätzlich befanden sich 2 verschiedene Materialien zwischen den Glasplatten: Einerseits eine Kupersulfatlösung mit 2,6 M.-% Kupfersulfat und andererseits ein Polyurethan, das in OS 11a Systemen verwendet wird. Mit der Kupersulfatlösung konnte die Messzeit aufgrund der größeren Signalamplitude gegenüber dem Polyurethan deutlich verkürzt werden, während das Polyurethan eine Schicht eines Oberflächenschutzsystems widerspiegelt.

Tab. 4–2: Übersicht zu den untersuchten Parametern

Parameter	Einheit	Varianten					
Abstand zwischen Stahlstab und Probestisch (näherungsweise)	cm	2	3	4	5	6	7
Durchmesser der Stahlstäbe	mm	6		8		10	
Abstand der Stahlstäbe zueinander (näherungsweise)	cm	10		12,5		15	
Anzahl der Stahlstäbe	-	2			4		
Stahlart	-	Edelstahl			Baustahl		
Orientierung der Stahlstäbe zu den Magnetfeldlinien	°	0			90		
Dicke der unteren Glasplatte	mm	1	2	3		4	
Material	-	Kupfersulfatlösung			Polyurethan		

Bei sämtlichen Messungen betragen die Dicke des sensitiven Volumens und die Schrittweite des Lifts 50 μm . Es wurde eine Pulslänge von 9 μs , eine Echozeit von 0,049 ms, eine repetition duration von 0,3 s und eine Signalverstärkung von 100 dB gewählt. Die in den nachfolgenden Diagrammen aufgetragenen Intensitäten über die Probertiefe wurden aus dem Integral der ersten 10 Echos bestimmt (Erläuterung in Abschnitt 4.1.4, 2.). Anhand der Tiefenprofile sind Aussagen zum Einfluss der Bewehrung auf die gemessene Materialdicke, Intensität und Materialposition möglich.

Zur Überprüfung, ob die beschriebenen Untersuchungen am vereinfachten Versuchsaufbau auf beschichtete Stahlbetonplatten übertragbar sind, wurden Betonplatten ohne und mit Stahlbewehrung hergestellt. Die bewehrten Betonplatten wiesen 4 Stahlstäbe mit einem Durchmesser von 8 mm auf. Die Stäbe waren als Bewehrungsmatte angeordnet, der Abstand der Stahlstäbe betrug je Richtung 10 cm. Anstelle eines mehrlagigen Oberflächenschutzsystems wurde ein Modellsystem bestehend aus einer selbstklebenden Polytetrafluorethylen (PTFE)folie und zwei Lagen Klebeband auf den Betonplatten appliziert. Streuungen resultierend aus einem Oberflächenschutzsystem mit unterschiedlichen Polymeren wurden damit vermieden. Der Aufbau ist in Bild 4–8 dargestellt. Die angegebenen Schichtdicken wurden mittels Mikroskop am Probenquerschnitt bestimmt.

**Bild 4–8:** Aufbau der bewehrten/unbewehrten Betonplatten mit dem Modellsystem

4.2.3 ERGEBNISSE

Bild 4–9 zeigt zwei Tiefenprofile die mit dem in Bild 4–7 dargestellten Versuchsaufbau ermittelt wurden. In einem Fall wurde keine Stahlbewehrung oberhalb des Glas-Kupfersulfatlösung-Glas-Elementes angeordnet und im anderen Fall befanden sich zwei Stahlstäbe mit einem Durchmesser von

8 mm, einem Abstand von 10 cm zu einander, einer Distanz zur Probe von 2 cm und einer Ausrichtung zu den Magnetfeldlinien von 90° oberhalb des Sandwichelementes. Da sich in den Glasscheiben keine Wasserstoffisotope befinden, ist lediglich innerhalb der Kupfersulfatlösung eine Intensität messbar. Zur Bestimmung der Schichtdicke der Kupfersulfatlösung wurde auf den ansteigenden und abfallenden Ästen der Messkurve die Messtiefe bei $\frac{1}{2}$ der gemittelten maximalen Intensität ermittelt und voneinander subtrahiert. Anhand dieser Punkte wurde auch die Verschiebung des sensitiven Volumens infolge des Stahls errechnet. Bei einer 30ig fachen Wiederholung der Profilmessungen ergab sich für die berechnete Schichtdicke eine Standardabweichung von $2,5 \mu\text{m}$. Zur Reduktion der Messzeit wurden alle nachfolgenden Messungen als Einfachbestimmung mit 28 Scans durchgeführt.

Die Anziehungskraft des Stahls bewirkt eine Verschiebung des Magnetfeldes der NMR-MOUSE in Richtung Stahl. Somit verschiebt sich die Position des sensitiven Volumens um etwa $400 \mu\text{m}$ in größere Messtiefen (Profilverschiebung). Zudem erfährt das Magnetfeld durch den Stahl eine Homogenisierung. Die daraus resultierende Verringerung des Gradienten bedingt eine Vergrößerung des in der Probe angeregten Volumens, was sich im Anstieg der Intensität widerspiegelt (Bild 4–9).

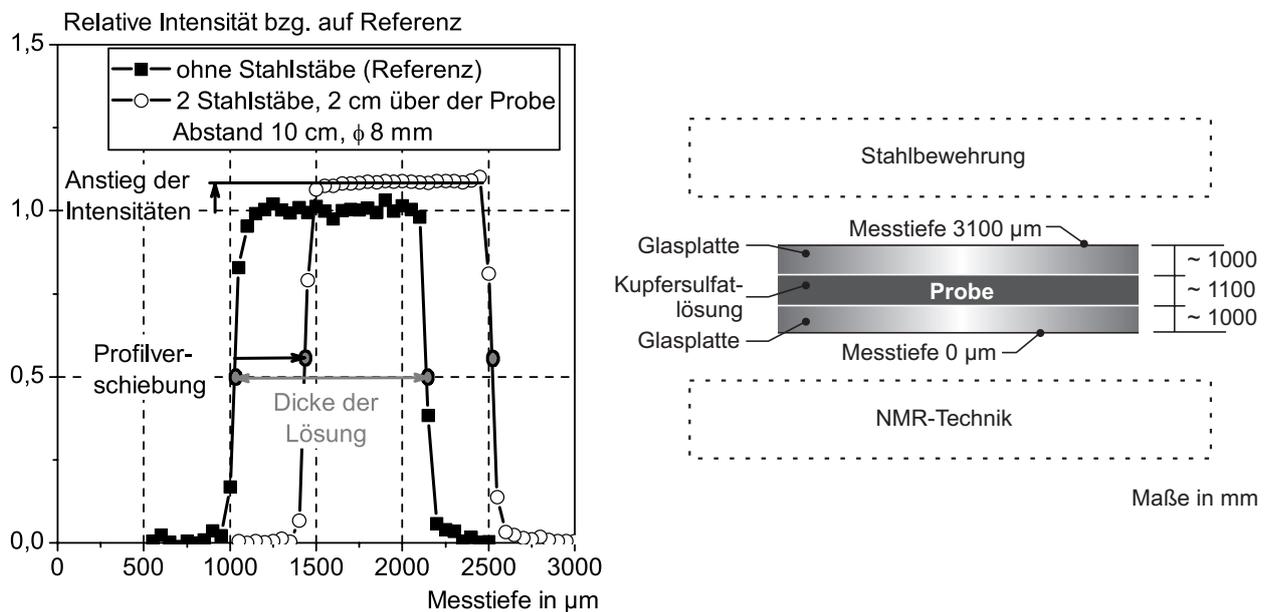


Bild 4–9: Links: Tiefenprofile des Sandwichelementes Glas-Kupfersulfatlösung-Glas mit und ohne Stahlbewehrung oberhalb der Probe. Rechts: Schematische Darstellung der Probenanordnung.

Bild 4–10, links verdeutlicht den Anstieg in der gemessenen Intensitäten der Kupfersulfatlösung bezogen auf die Messung ohne Stähle oberhalb der Probe. Für die Messungen wurden 2 Stähle mit einem Abstand von 10 cm zueinander und einer Orientierung von 90° zum Magnetfeld in verschiedenen Abständen zum Messtisch angeordnet. Je näher die Stähle am Magnetfeld sind (kleinster Abstand 2 cm) und je größer die Stahlmenge (größter Durchmesser 10 mm) je stärker steigt die Intensität an. Der maximale Anstieg beträgt rund 11 %. Bei einem Abstand von 7 cm hat der Stahl unabhängig vom Durchmesser keinen Einfluss mehr auf die Intensität.

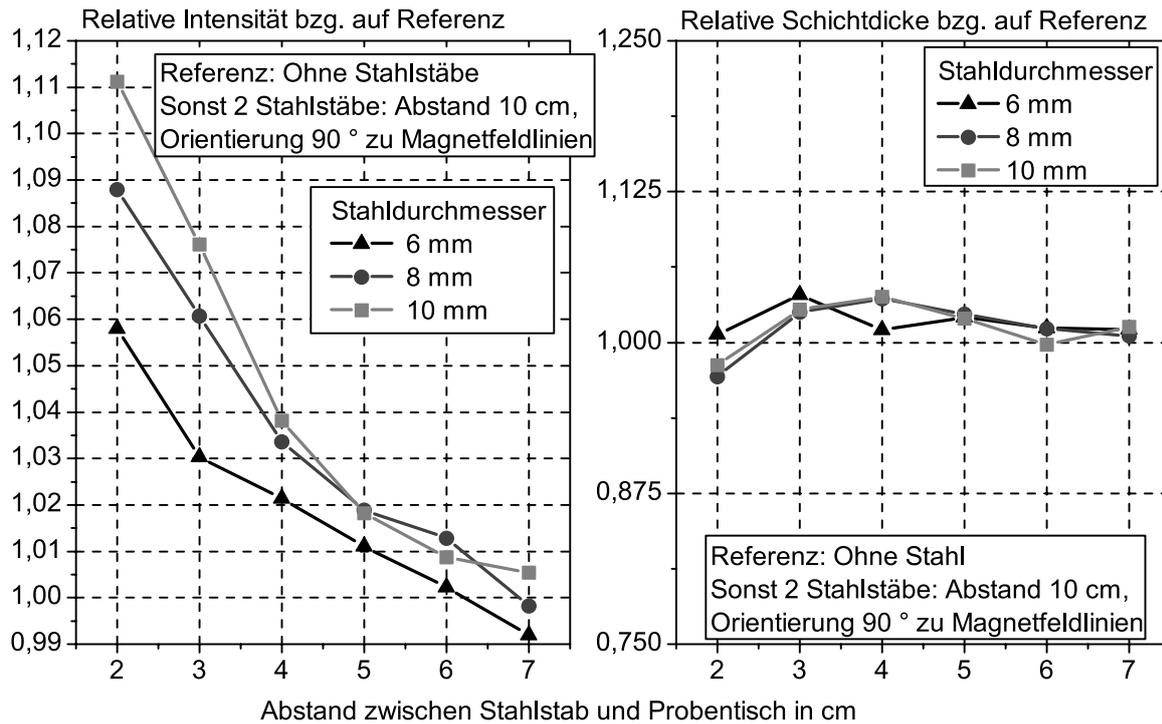


Bild 4–10: Einfluss des Abstandes des Stahlstabs zum Proben­tisch und des Stahldurchmessers auf die relative Intensität (links) und auf die relative Schichtdicke (rechts) der Kupfersulfatlösung bzgl. auf die Messung ohne Stahl

Die anhand der Profile ermittelten Schichtdicken der Kupfersulfatlösung verändern sich infolge der Stähle oberhalb der Probe nicht, wie Bild 4–10, rechts verdeutlicht. Dies gilt für die untersuchten Parameter (Tab. 4–2) genauso wie für Messungen mit der PM 25. Im Bild 4–10, rechts ist die relative Schichtdicke bezogen auf die Messung ohne Stahl oberhalb der Probe in Abhängigkeit vom Abstand des Stahls zum Proben­tisch und vom Stahldurchmesser aufgetragen. Die relative Schichtdicke schwankt um 1, der tendenziell geringe Anstieg der Schichtdicke ist nicht signifikant sondern auf Streuungen im Mess- und Auswerteverfahren zurückzuführen. Die Abweichungen in den berechneten Schichtdicken aller Messungen betragen maximal 44 μm . Diese Abweichungen könnten durch längere Messzeiten, höhere Wiederholraten, verbesserte Probenpositionierung und genauere Datenauswertung reduziert werden, aber für die hier vorgestellten Untersuchungen war die Genauigkeit ausreichend.

In Bild 4–11, links ist die Verschiebung des Profils infolge der Stähle oberhalb der Probe in Relation zur Referenz dargestellt. Infolge zweier Stahlstäbe mit einem Durchmesser von 10 mm, einem Abstand zueinander von 10 cm und einer Orientierung von 90° zu den Magnetfeldlinien verschiebt sich das Profil bei einem Abstand von 2 cm zwischen Stahl und Messtisch um knapp 500 μm . Je größer der Abstand zwischen Stahl und Proben­tisch (also je größer die Betondeckung am Bauwerk) desto geringer ist die Verschiebung des Profils in Richtung Stahl (Bewehrung). Gleiches gilt für die Stahlmenge: Je kleiner der Stahlstabdurchmesser je geringer die Profilverschiebung. Ab einem Abstand zwischen Stahl und Proben­tisch größer 4 cm hat der Stahldurchmesser jedoch keinen signifikanten Einfluss mehr.

Die Art des Stahls (Bewehrungsstahl oder Edelstahl) hat keinen Einfluss auf die Messungen. Sowohl die Verschiebung des Profils in Richtung Stahl als auch der Anstieg der Intensitäten sind bei beiden Stahlsorten in der gleichen Größenordnung.

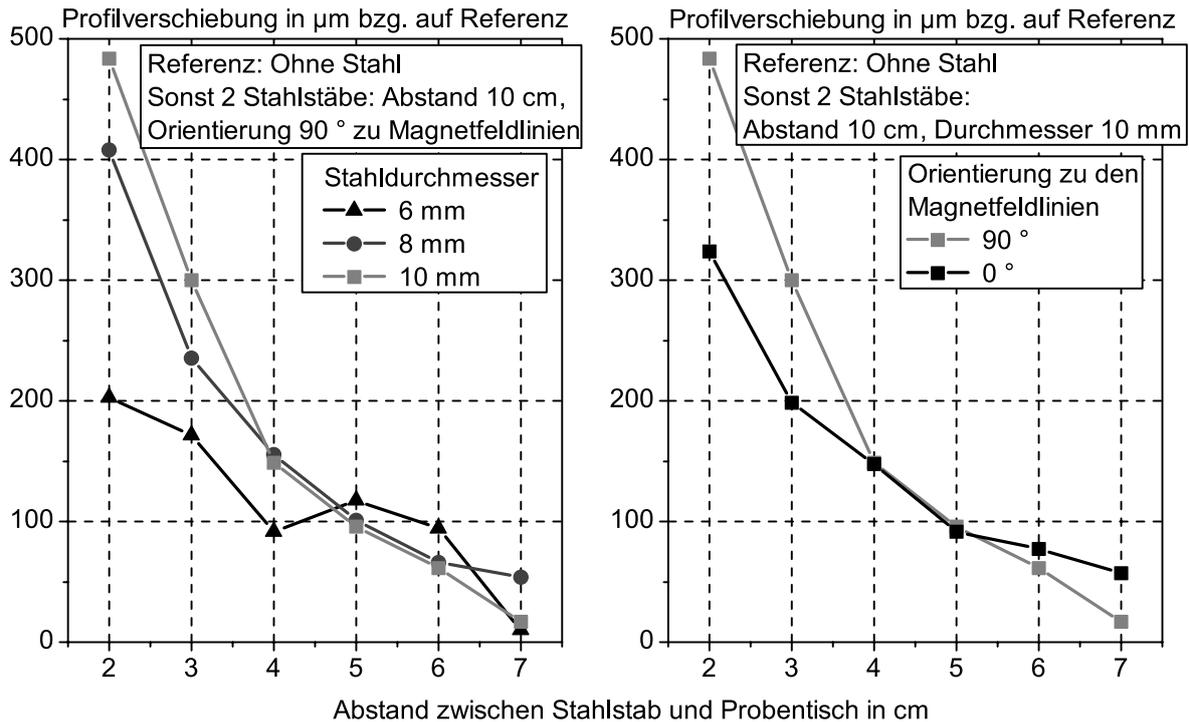


Bild 4–11: Einfluss des Abstands des Stahlstabs zum Probestisch in Abhängigkeit vom Stahldurchmesser (links) bzw. der Orientierung des Stahls zu den Magnetfeldlinien (rechts) auf die Profilverschiebung bzgl. auf die Messung ohne Stahl

Die Ausrichtung der Stahlstäbe zu den Magnetfeldlinien hat bei Abständen zwischen Stahl und Probestisch kleiner 4 cm einen signifikanten Einfluss auf die Profilverschiebung (Bild 4–11, rechts). Die Orientierung des Stahls um 90° zu den Magnetfeldlinien bedingt bei einem Abstand zwischen Stahl und Probestisch von 2 cm eine Erhöhung der Verschiebung um rund $150 \mu\text{m}$ gegenüber des parallelen Verlaufs der Bewehrung zu den Magnetfeldlinien.

Bild 4–12, links verdeutlicht, dass mit zunehmendem Abstand der Stahlstäbe voneinander (Abkürzung w), dies entspricht auch einer größeren Distanz zwischen Stahl und Messfeld, die Profilverschiebung abnimmt. Bei Abständen größer 4 cm zwischen Stahl und Probestisch, ist dieser Einfluss jedoch nicht mehr relevant. Bei einem Stahldurchmesser von 6 mm und einem Abstand der Stahlstäbe von 15 cm (Distanz vom Messfeld jeweils 6,5 cm) hat der Abstand zwischen Stahl und Probestisch keine signifikante Bedeutung mehr.

Mit der verwendeten NMR-MOUSE PM 5 können Messtiefen von 0 bis 5 mm erreicht werden. Bild 4–12, rechts beantwortet die Frage inwiefern die Position des sensitiven Volumens in Tiefen zwischen 0 und 5 mm bei der Untersuchung des Einflusses der Stahlbewehrung auf das gemessene Profil eine Rolle spielt. Für diese Messungen wurde die Schicht mit Kupfersulfatlösung mit Objektträgern aus Glas immer um 1 mm in Richtung Bewehrung verschoben (Bild 4–7). Wie im Diagramm gezeigt, hat die Position des sensitiven Volumens keinen signifikanten Einfluss auf die Verschiebung des Profils infolge des Stahls. Das bedeutet gleichzeitig, dass eine Schwankungsbreite von bis zu 5 mm in der Betondeckung (Abstand zwischen Stahl und sensitivem Volumen) keine eindeutige Relevanz für die Profilverschiebung hat.

Bild 4–13, links verdeutlicht, dass der Einfluss des Stahls oberhalb des Messbereichs der NMR-MOUSE weitgehend unabhängig vom untersuchten Material ist. Die Profilverschiebung war bei der Bestim-

mung des Profils von Polyurethan und Kupfersulfatlösung in der gleichen Größenordnung. Lediglich bei einem Abstand von 2 cm zwischen Messtisch und Stahl, war die Verschiebung mit der Probe aus Kupfersulfatlösung tendenziell etwas größer.

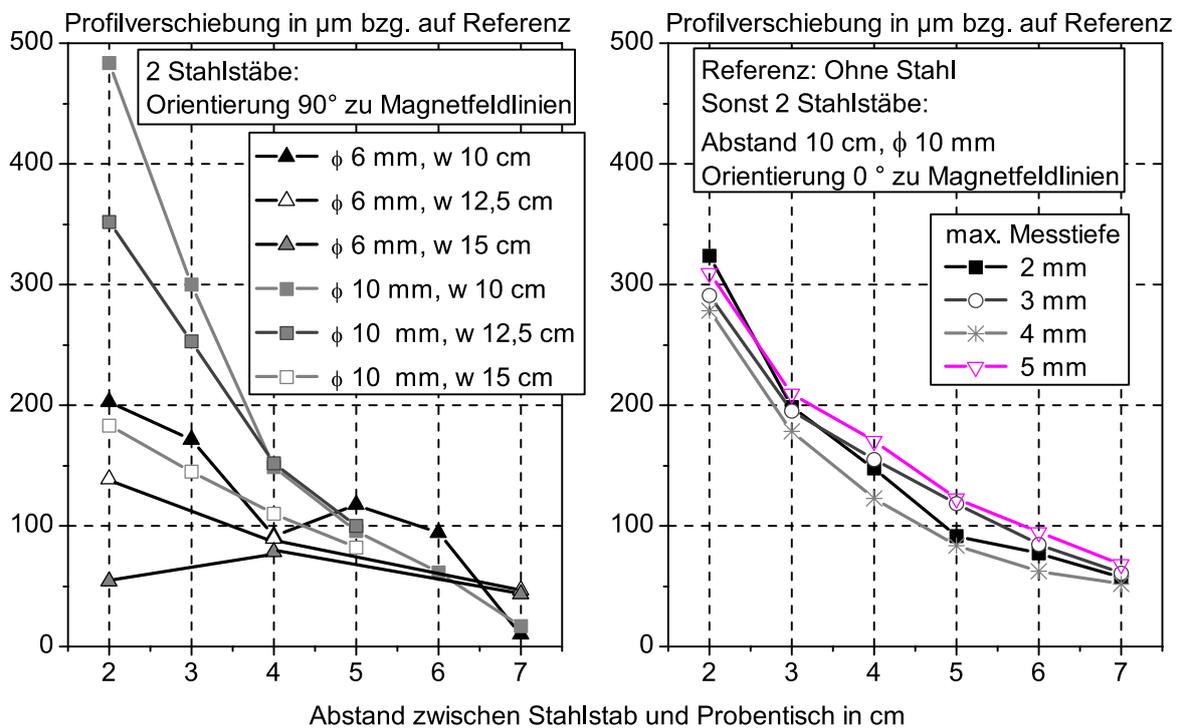


Bild 4–12: Einfluss des Abstandes des Stahlstabs zum Proben­tisch in Abhängigkeit von den Abständen der 2 Stahlstäbe zueinander (w) (links) bzw. der maximalen Tiefe des sensitiven Volumens in der Kupfersulfatlösung (rechts) auf die Profilverschiebung bzg. auf die Messung ohne Stahl

Die Erhöhung der Stahlmenge von 2 auf 4 Stahlstäbe bewirkt einen Anstieg der Profilverschiebung in Richtung Stahl (Bild 4–13, rechts). Die 4 Stahlstäbe bilden einen Ausschnitt aus einer Stahlmatte mit Stahlabständen von 10 bzw. 15 cm ab. Die untersten Stahlstäbe hatten jeweils eine Orientierung von 90° zu den Magnetfeldlinien. Für den Fall, dass 4 Stahlstäbe mit einem Durchmesser von 10 mm, angeordnet als Matte mit Abständen von 10 cm, mit einem minimalen Abstand von 2 cm zum Proben­tisch untersucht werden, verschiebt sich das Profil um rund $620 \mu\text{m}$ gegenüber der Referenz ohne Stahl und die Signalintensität steigt gegenüber der Referenz ohne Stahl um 13 %.

Die in diesem Abschnitt bisher dargestellten Untersuchungen wurden mit der PM 5 durchgeführt. Bild 4–14 verdeutlicht, dass die prinzipiellen Aussagen auch für Messungen mit der PM 25 gelten. Aufgrund des stärkeren Magnetfeldes ist der Einfluss der Bewehrung oberhalb des sensitiven Volumens auf die Profilposition und die Signalintensität jedoch im Vergleich zur PM 5 größer. Somit nimmt die Verschiebung des Profils bezogen auf die Referenz ohne Stahl um das 2 bis 3 fache gegenüber der PM 5 zu. Die relative Intensität des Signals bezogen auf die Referenz steigt bei einem Stahldurchmesser von 8 mm, einem Stahlabstand von 10 cm, einer Ausrichtung des Stahls 90° zum Magnetfeld bei einem Abstand zwischen Stahl und sensitivem Volumen von 4 bzw. 5 cm um etwa 8 % gegenüber den Messungen mit der PM 5. Bild 4–14 verdeutlicht weiterhin, dass die 0° -Ausrichtung des Stahls zum Magnetfeld sowie ein größerer Abstand der Bewehrungsstäbe bei der PM 25 ebenfalls zu einer Verringerung der Profilverschiebung führt.

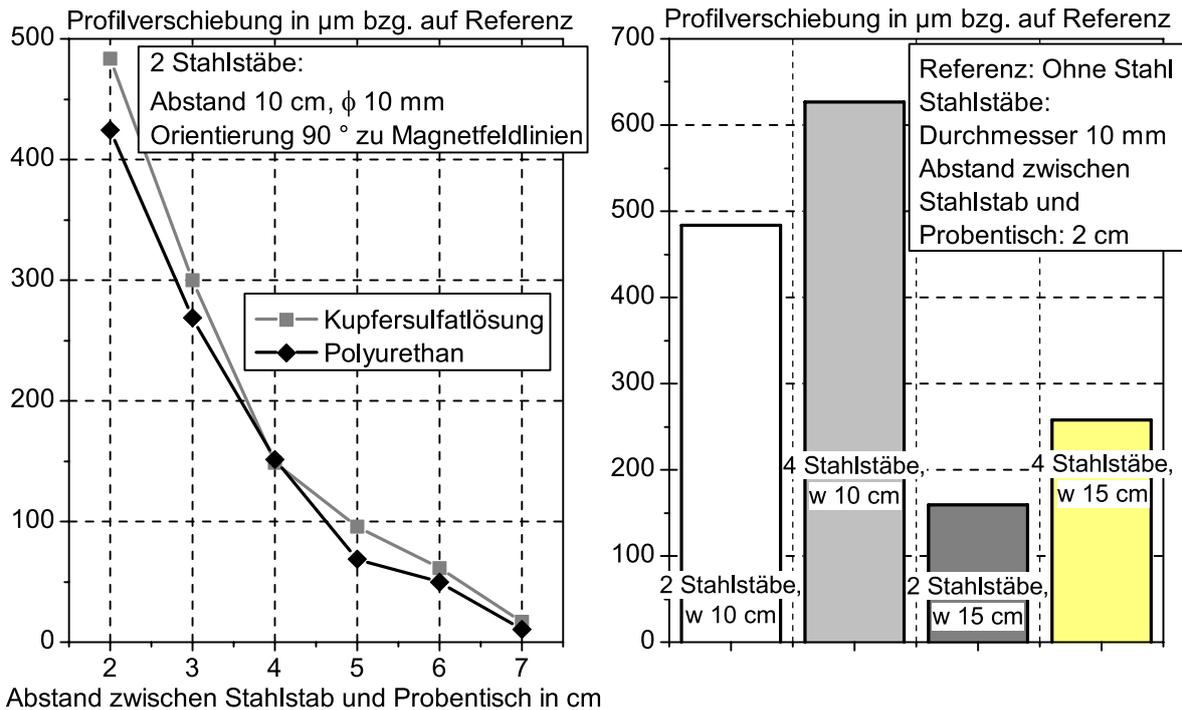


Bild 4-13: Einfluss des Abstandes des Stahlstabs zum Probestisch in Abhängigkeit vom Material zwischen den Glasplatten (links) bzw. Einfluss der Stahlmenge (2 Stäbe parallel zueinander oder 4 Stäbe als Matte angeordnet) und des Abstandes zwischen den Stahlstäben (w) (rechts) auf die Profilverschiebung bzgl. auf die Messung ohne Stahl

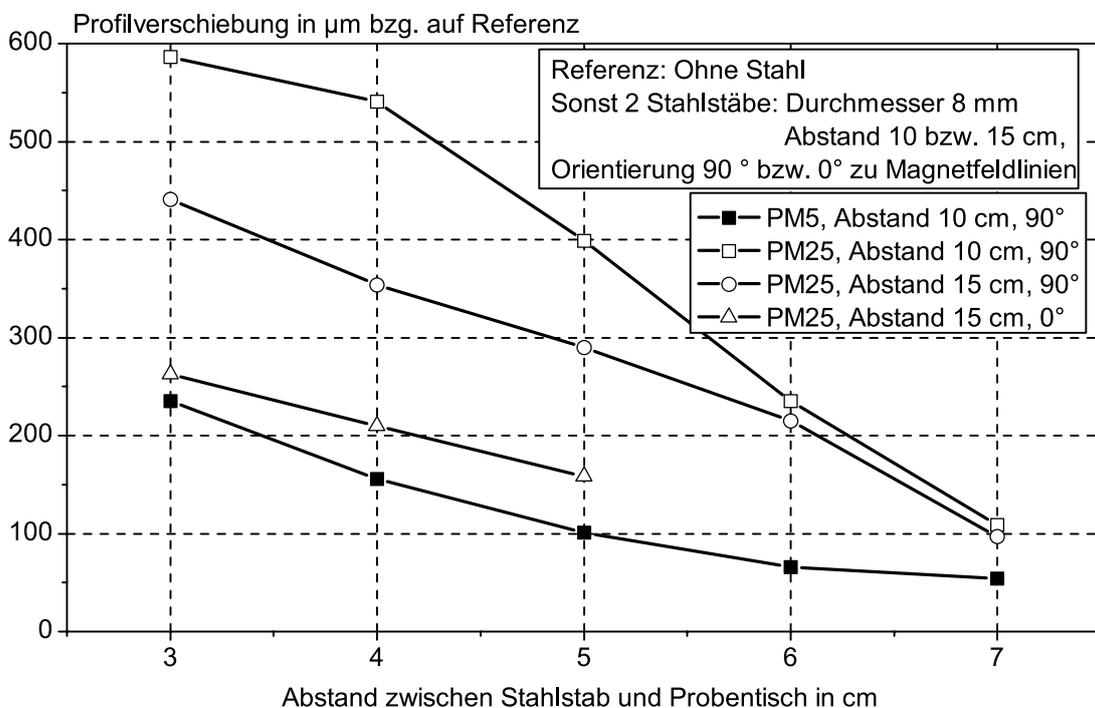


Bild 4-14: Vergleich des Einflusses der Bewehrung oberhalb des sensitiven Volumens bei der PM 5 und der PM 25

4.2.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die zuvor dargestellten Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von Stahl im Bereich von NMR-MOUSE-Messungen folgende Einflüsse auf die Bestimmung von Tiefenprofilen hat:

- Verschiebung des Profils in Richtung Stahl,
- Anstieg der gemessenen Intensitäten,
- aber unveränderte Schichtdicken!

Dies bedeutet für die Messung von Schichtdicken von Beschichtungen auf Stahlbetonbauwerken, dass die gemessene Schichtdicke unabhängig von der Stahlbewehrung ist. Lediglich die Position und Signalintensität der Beschichtungsschichten werden von der im Beton befindlichen Bewehrung beeinflusst. Inwiefern die Position und Signalintensität der Beschichtungsschichten infolge Stahlbewehrung mit Durchmessern bis 10 mm verändert werden, ist von folgenden Parametern abhängig:

- Betondeckung (je größer desto geringer der Einfluss, bei 7 cm nur noch minimal)
- Stahldurchmesser (je größer desto größer der Einfluss, maßgebend bei Betondeckungen ≤ 4 cm)
- Horizontaler Abstand der Stähle zueinander und vom Messfeld (je größer desto geringer der Einfluss, maßgebend bei Betondeckungen ≤ 4 cm)
- Stahlmenge (je mehr desto größer der Einfluss)
- Orientierung des Stahls zum Magnetfeld (90° hat einen größeren Einfluss als 0° , maßgebend bei Betondeckungen < 4 cm)

Die Betrachtung der relativen Profilverchiebung bezogen auf die Referenz ohne Stahl ist aufgrund der unterschiedlichen Messtiefen nicht ziel führend: So wäre bei einer Messtiefe von 2000 μm und einer Profilverchiebung von 200 μm die relative Verschiebung mit 10 % geringer als in einer Messtiefe mit 1000 μm (20 %). Dies würde die Ergebnisse verzerrt darstellen, da in Bild 4–12, rechts gezeigt wurde, dass die Messtiefe keinen Einfluss hat.

Eine Variante zur Berücksichtigung des Bewehrungseinflusses bei Messungen an Beschichtungen auf Stahlbetonbauwerken wäre die Abbildung des Einflusses in einem Modell. Mittels vor Ort durchgeführten Stahlortungen (Betondeckung, Stahldurchmesser, Stababstände) und dem Modell könnte dann eine Korrektur der Bauwerksuntersuchungen erfolgen.

Eine einfachere Alternative zum Modell wäre jedoch die Applikation und Messung eines Markers am Bauwerk. Anhand des Markers kann die Profilverchiebung infolge Bewehrung bei jeder Messung berücksichtigt werden. Da die Schichtdicke an sich nicht von der Bewehrung beeinflusst wird, ist hier keine Korrektur notwendig. Bei der Signalintensität ist ebenfalls keine Korrektur notwendig, weil dieser relative Wert unabhängig vom Material an einer Messstelle immer die gleiche Verschiebung erfährt und die absolute Größe der Signalintensität bei einer Profilmessung nicht maßgebend ist. Gleiches gilt für die Beobachtung von Wassertransportprozessen im Beton: Solange die Position der Bewehrung zum Messfeld unverändert bleibt und qualitative Aussagen zur zeitlichen und tiefenabhängigen Veränderung der Wassermenge getroffen werden sollen, beeinflusst die Bewehrung die Aussagekraft der Messergebnisse nicht. Fragen bei denen die absolute Größe der Signalintensität bei variierender Stahlbewehrung von Relevanz ist, können ohne Modell jedoch nicht beantwortet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung des Wassergehaltes in M.-% anhand von NMR-Intensitäten. Hierfür sind neben dem Modell zum Bewehrungseinfluss jedoch auch Kalibrierkurven erforderlich /Kei11/. Somit werden in diesem Fall objektspezifische Laboruntersuchungen notwendig.

Bild 4–15 verdeutlicht die baupraktisch einfache Lösung mit Markern während einer Profilmessung. Die Übertragbarkeit dieser Untersuchungen auf beschichtete Stahlbetonkörper wird im nachfolgenden

den Abschnitt gezeigt.

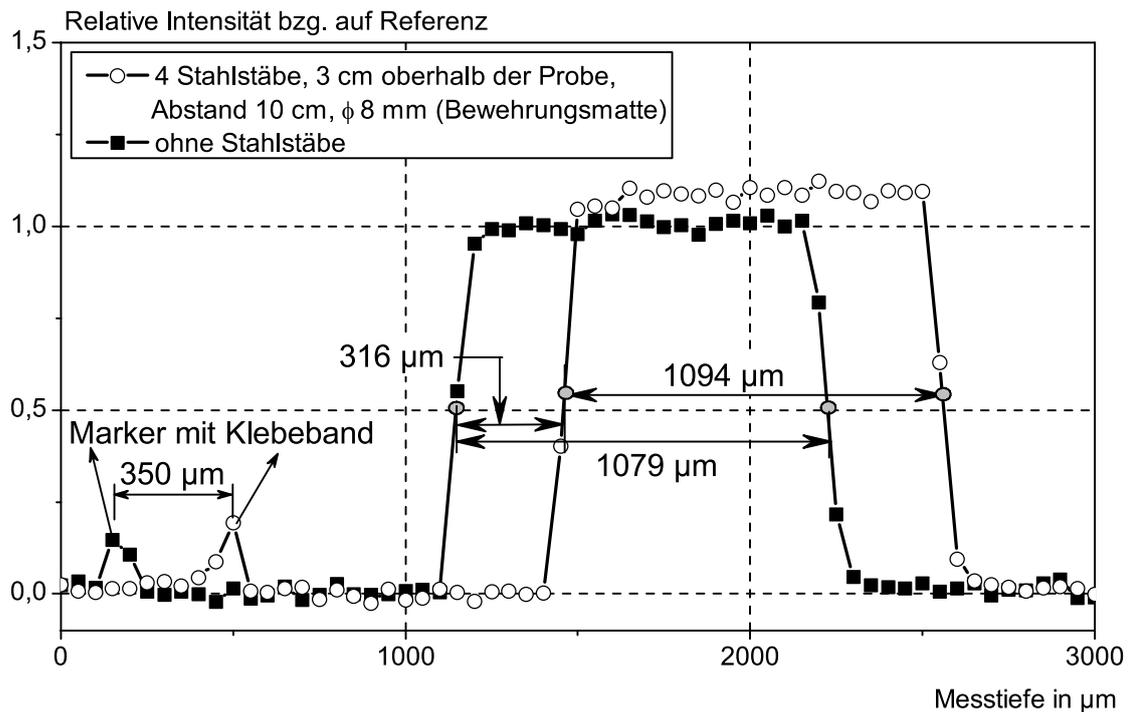


Bild 4-15: Tiefenprofil des Sandwichelementes (Glas-Kupfersulfatlösung-Glas) mit einem Klebeband als Marker

4.2.5 ÜBERTRAGBARKEIT DER UNTERSUCHUNGEN AUF DIE SCHICHTDICKENMESSUNG

Zur Überprüfung inwiefern die Messungen am Glas-Kupfersulfatlösung-Glas Element auf beschichtete bewehrte Betonkörper übertragbar sind, wurde der in Bild 4-8 dargestellte Versuchsaufbau gewählt. Im Beton befand sich ein quadratischer Ausschnitt einer Stahlmatte mit Stababständen von 10 cm und Stabdurchmessern von 8 mm. Der Betonkörper wurde so auf dem Proben Tisch positioniert, dass das sensitive Volumen an allen Seiten den gleichen Abstand zu den vier Stahlstäben hatte. Die beiden unteren Stahlstäbe waren 90° zu den Magnetfeldlinien ausgerichtet. Die Betondeckung betrug 2, 3 und 4 cm. Als Referenz wurde ein beschichteter Betonkörper ohne Stahlbewehrung untersucht.

Bild 4-16 zeigt das Profil der Modellbeschichtung auf dem Betonkörper ohne Bewehrung und auf dem Betonkörper mit Bewehrung mit einer Betondeckung von 3 cm. Von der Messtiefe 0 ausgehend sind zunächst die beiden Peaks des zweilagig aufgetragenen Klebebands (Marker) zu sehen. Dann folgt die PTFE-Schicht. Da das PTFE keine Wasserstoffisotope aufweist, fällt in diesem Bereich die Signalintensität auf 0. Die Klebeschicht des PTFEs ist hingegen durch einen deutlichen Anstieg der Signalintensität erkennbar. Auf die Signalintensität des PTFE-Klebers wurde die relative Intensität in Bild 4-16 bezogen. Aufgrund der geringen Schichtdicken wurden die Untersuchungen mit einer Schrittweite von 20 μm , einer Echozeit von 0,082 ms und einer repetition duration von 0,5 s durchgeführt. Infolge der Stahlbewehrung verschiebt sich das gemessene Profil um rund 320 μm , während die Schichtdicken im Rahmen der Messgenauigkeit unverändert bleiben. Die Größenordnung der Profilverchiebung stimmt mit den in Bild 4-15 gezeigten Messungen überein. In beiden Untersu-

chungsreihen wurde die identische Stahlanordnung gewählt.

Tab. 4-3 bestätigt nochmals die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse am Glas-Kupfersulfatlösung-Glas Element auf beschichtete, bewehrte Betonkörper. Die in Bild 4-15 und Bild 4-16 exemplarisch für eine Betondeckung von 3 cm dargestellten Schichtdicken und Profilverschiebungen sind in Tab. 4-3 für alle untersuchten Varianten (ohne Stahl, Betondeckung 2, 3, 4 cm) zusammengefasst.

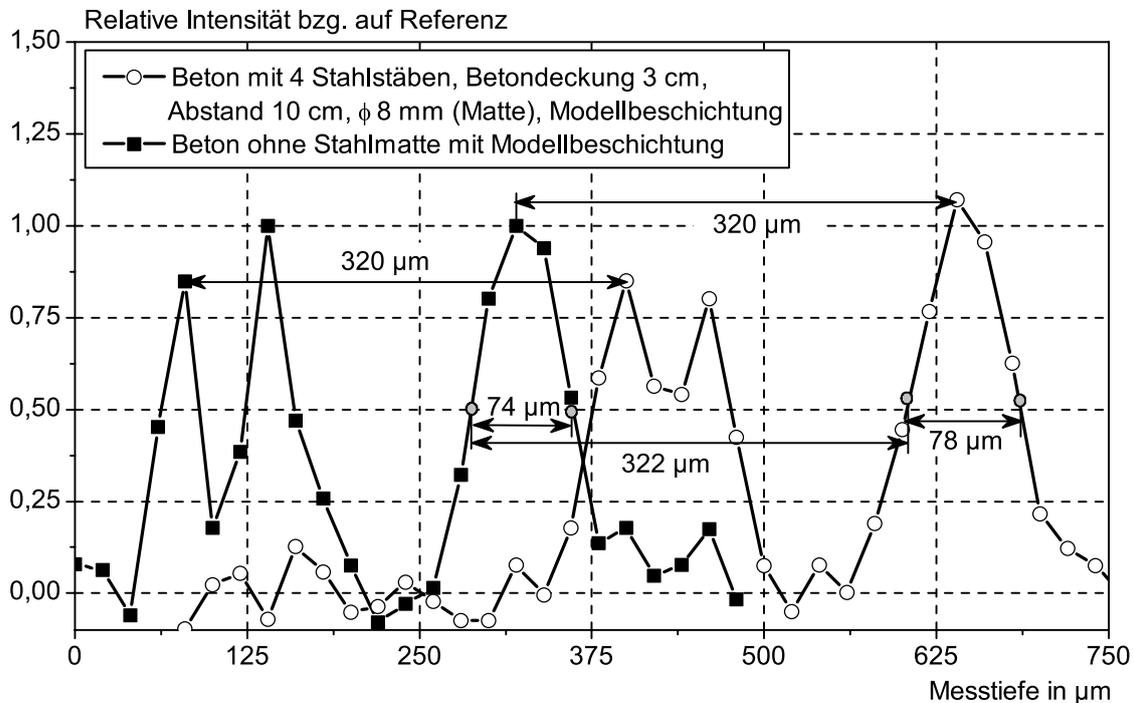


Bild 4-16: Tiefenprofil der Modellbeschichtung auf Beton. Der Aufbau der Modellbeschichtung ist in Bild 4-8 dargestellt.

Tab. 4-3: Vergleich des Glas-Kupfersulfatlösung-Glas Elementes (g-c-g) mit der auf Beton aufgeklebten PTFE-Schicht (c-Tglue) hinsichtlich des Bewehrungseinflusses (Stahlmatte: 4 Stahlstäbe, Durchmesser 8 mm, Abstand 10 cm)

Probe	Abstand zwischen Stahl und Proben Tisch	Schichtdicke	Profilverschiebung durch die Bewehrung
-	cm	µm	
g-c-g	- (kein Stahl)	1079	-
g-c-g	2	1045	470
g-c-g	3	1094	316
g-c-g	4	1070	264
c-Tglue	- (kein Stahl)	74	-
c-Tglue	2	76	430
c-Tglue	3	78	322
c-Tglue	4	79	215

4.2.6 ZUSAMMENFASSUNG ZUM EINFLUSS DER STAHLBETONBEWEHRUNG

Bei der zerstörungsfreien Untersuchung des Aufbaus und der Schichtdicken von Beschichtungen auf Stahlbetonbauwerken mit der NMR-MOUSE ist der Einfluss der Stahlbewehrung auf die Messergebnisse zu berücksichtigen. Es wurde gezeigt, dass sich das gemessene Tiefenprofil in Abhängigkeit von der Menge und der Lage der Stahlbewehrung im Beton verschiebt während die Signalintensität ansteigt. Die gemessenen Schichtdicken werden hingegen nicht von der Bewehrung beeinflusst. Es wurde eine auch auf der Baustelle anwendbare Methode aufgezeigt, um die Profilverschiebung infolge Bewehrung zu erfassen und zu korrigieren: Ein auf der Beschichtungsoberfläche aufgebracht Marker dient als rechnerischer Nullpunkt auf den sich das weitere Profil bezieht.

Auf die Herleitung von Gleichungen zur Korrektur des Bewehrungseinflusses auf die Signalintensität wurde verzichtet, da im Allgemeinen qualitative Unterschiede in den Signalintensitäten eines Tiefenprofils von Interesse sind. Da in einem Tiefenprofil alle gemessenen Signalintensitäten infolge Bewehrung um den gleichen Betrag verändert werden, sind vergleichende Aussagen von der Bewehrung unabhängig. Sollen Tiefenprofile an unterschiedlichen Bauwerkspositionen ermittelt und miteinander verglichen werden, so ist darauf zu achten, dass die Position der Bewehrung zum Messfeld nicht verändert wird. Sind absolute Werte erforderlich, sollten die relevanten Bewehrungsanordnungen im Labor untersucht und objekt- sowie messspezifische Korrekturgleichungen erarbeitet werden.

Der Einfluss der Bewehrung auf Messwerte der PM 25 wurde ebenfalls untersucht (Bild 4-14 sowie in */Bra11/*). Die Verschiebung des NMR-Signals in Richtung Bewehrung und die Erhöhung der Signalintensitäten infolge Bewehrung wurden dabei auch festgestellt. Der Einfluss der Messtiefe wurde nicht betrachtet. Bei einer maximalen Messtiefe von 25 mm ist die Position des sensitiven Volumens sicherlich eine weitere Einflussgröße. Aufgrund des stärkeren Magnetfeldes der PM 25 ist die Anziehungskraft zwischen NMR-MOUSE PM 25 und Bewehrung deutlich größer als bei der PM 5. Ausreichend hohe Betonüberdeckungen (z. B. 6 cm, bei Mattenbewehrung mit Stahldurchmesser 12 mm, Stahlabständen 10 cm) sollten vor Versuchsbeginn sichergestellt werden.

Die Relaxationszeiten T_1 und T_2 der Kupfersulfatlösung, ermittelt anhand einer monoexponentiellen Anpassungsfunktion, werden durch die Stahlbewehrung nicht beeinflusst.

4.3 EINFLUSS DER TEMPERATUR

Veränderungen der Temperatur im Umfeld der NMR-MOUSE bedingen ebenfalls eine Verschiebung des NMR-Profiles. Unter der Annahme, dass die Permanentmagneten die Temperaturänderung unmittelbar annehmen gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = \frac{f_0 \cdot \Delta T \cdot k_T}{G}$$

Gleichung 4-8

Hierbei sind Δx die Verschiebung des sensitiven Volumens in mm, f_0 die Resonanzfrequenz in MHz, ΔT die Temperaturdifferenz in K, k_T der Temperaturkoeffizient der Remanenz in 1/K und G die Gradientenstärke in MHz/mm. Der Temperaturkoeffizient der Remanenz beträgt 0,0011 1/K.

Für die PM 5 bedeutet dies bei einer Resonanzfrequenz von 18,15 MHz und einer Gradientenstärke von 1 MHz/mm eine Profilverschiebung von 20 $\mu\text{m}/\text{K}$.

Für die PM 25 ist der Einfluss größer, da die Gradientenstärke 0,27 MHz/mm und die Resonanzfrequenz 13 MHz beträgt. Daraus resultiert eine Profilverchiebung von 53 $\mu\text{m}/\text{K}$.

Somit ist bei Profil-Messungen mit der NMR-MOUSE unbedingt auf eine konstante Temperierung der Magneten zu achten. Dies ist entweder durch Messungen in Konstantklimarräumen oder durch eine entsprechende Vorkonditionierung und/oder Isolierung der Permanentmagneten zu erreichen.

Sind Tiefenprofile an einer Messposition zu verschiedenen Zeitpunkten geplant und kann nicht gewährleistet werden, dass die Temperatur der Magneten bei jeder Untersuchung identisch ist, wird ebenfalls auf das Anbringen von Markern zurückgegriffen. Der auf die Bauwerksoberfläche aufgebraute Marker dient als rechnerischer Nullpunkt auf den sich das weitere Profil bezieht. Dennoch ist zu gewährleisten, dass sich die Magnettemperatur während der Erstellung des jeweiligen Tiefenprofils nicht verändert. Da die Einstellung einer homogenen Magnettemperatur mehrere Stunden dauert, ist das sensitive Volumen während der Messung unter Temperaturänderungen (z.B. Fassade im Sonnenschein) örtlich nicht stabil. Somit ist eine Isolierung des Magneten erforderlich.

4.4 EINFLUSS DER PROBENAUSRICHTUNG UND PROBENRAUHEIT

Entsprechend den vorangegangenen Erläuterungen befindet sich das sensitive Volumen in einem anhand der gewählten Randbedingungen definierten Abstand parallel zur NMR-MOUSE (Bild 4–3). Sind verschiedene Schichten innerhalb einer Probe hinsichtlich Relaxationszeiten, Signalintensitäten und/oder Schichtdicken zu analysieren, sollte die Probe parallel zur NMR-MOUSE ausgerichtet sein, um die Übergangsbereiche, in denen das sensitive Volumen in mehreren Schichten liegt, zu minimieren.

Bild 4–17 verdeutlicht die Notwendigkeit der parallelen Ausrichtung der Probe zur NMR-MOUSE. Bei der Probe handelt es sich z. B. um eine Betonscheibe auf der zwei polymere Schichten appliziert sind. Angenommen, die polymeren Schichten sind rund 200 μm und das sensitive Volumen rund 50 μm dick, so sollten im Idealfall 4 Messpunkte in jeder Schicht liegen. Aufgrund der Übergangsbereiche Probenisch/Probe, Schicht 1/Schicht 2 und Schicht 2/Beton wird das sensitive Volumen an den Messpunkten 1, 4, 5, 8 und 9 Protonen aus zwei Schichten enthalten. Das ideale Stufenprofil über die Probentiefe wird durch lineare Abfälle zwischen den jeweiligen Schichtintensitäten „verschmiert“. Kommt eine Schiefstellung der Probe zur NMR-MOUSE hinzu, so wachsen die Bereiche in denen das sensitive Volumen innerhalb zweier Schichten liegt an und die Anzahl der Messpunkte innerhalb der jeweiligen Schichten werden kleiner. Eine derartige Schiefstellung kann aus Unebenheiten in der Probe (raue Probenoberfläche, z. B. durch unterschiedliche Sandabstreuung an der Probenoberfläche, Schwankungen in den Schichtdicken) sowie keine parallele Ausrichtung der NMR-MOUSE zum Probenisch resultieren.

Ist die Probenoberfläche nicht eben und wird die Probenoberfläche auf dem Probenisch platziert, so befindet sich neben dem Probenmaterial auch Luft innerhalb der ersten sensitiven Volumen. Da Luft kaum Protonen aufweist, ist die Signalintensität somit an der Probenoberfläche geringer als im Bulkmaterial. Gleiches gilt, wenn das sensitive Volumen wieder aus der Probe austritt.

Mit dem in Abschnitt 4.2.3 erläuterten Verfahren zur Berechnung der Schichtdicken bei jeweils 1/2 der ansteigenden und abfallenden Äste der Messkurve, werden die beschriebenen symmetrischen

Schiefstellungen rechnerisch eliminiert. Eine weitere Konsequenz für die Versuchstechnik kann der Ersatz des Probentisches durch eine 3-Punkt-Auflagerung sein.

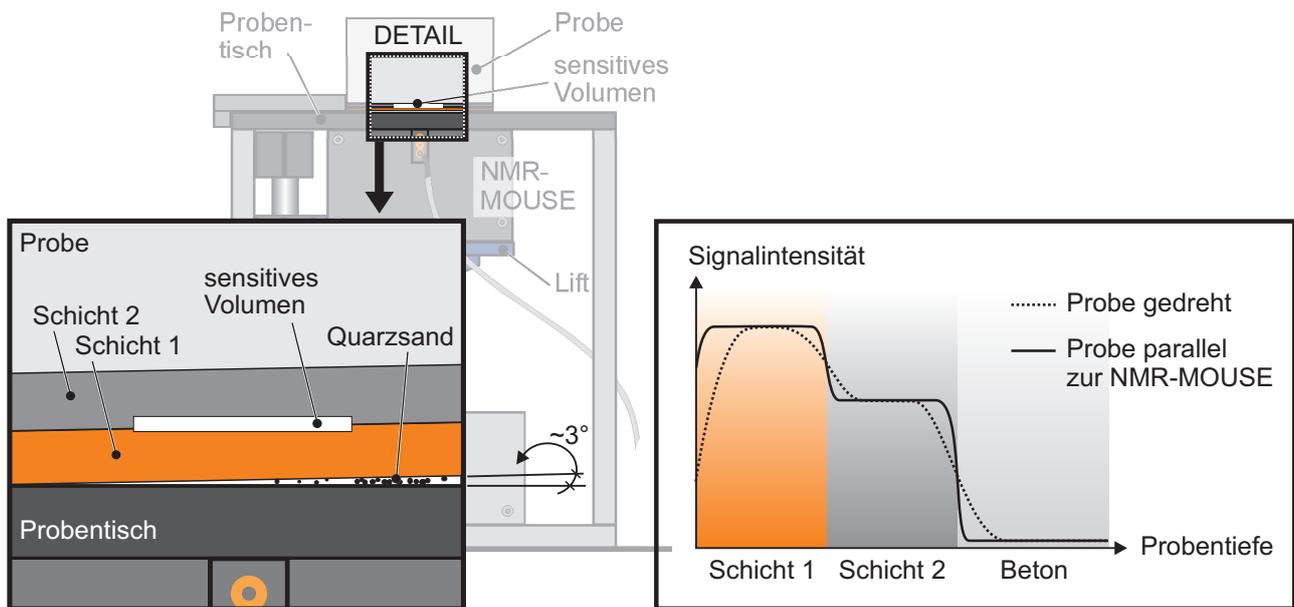


Bild 4-17: Einfluss der Probenausrichtung auf das Tiefenprofil

4.5 MESSGENAUIGKEIT BEI DER SCHICHTDICKENBESTIMMUNG

4.5.1 ALLGEMEINES

Die Schichtdicken applizierter Oberflächenschutzsysteme haben einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionalität und Dauerhaftigkeit von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen. Bisher gibt es kein zerstörungsfreies Verfahren, um die Schichtdicken polymerer Schutzschichten auf Betonbauteilen vor Ort zuverlässig zu ermitteln. Eine Kontrolle, ob vorgegebene Mindestschichtdicken beim Beschichten von Betonbauwerken eingehalten wurden, wird somit zurzeit nur stichprobenartig anhand von entnommenen Bohrkernen durchgeführt. Den Bedarf an einer zerstörungsfreien Prüfmethode für derartige Fragestellungen kann die NMR-MOUSE zukünftig hoffentlich abdecken.

Hinsichtlich der Aussagekraft der NMR-Schichtdicken-Messungen am Bauwerk wird nicht die Messtechnik der begrenzende Faktor sein. Vielmehr werden Oberflächenrauheit, lokale Unebenheiten, das Verlaufen einzelner Oberflächenschutzschichten ineinander und ähnliches die Qualität der Messungen bestimmen.

Um jedoch Aussagen zur Genauigkeit der NMR-MOUSE PM 5 hinsichtlich Schichtdickenmessungen treffen zu können, wurden zunächst zwei unterschiedliche Modellsysteme betrachtet. Darauf aufbauend wurden Schichtdickenmessungen an OS 11a-Systemen durchgeführt.

4.5.2 SCHICHTDICKENMESSUNGEN AN ZWEI MODELLSYSTEMEN

Im ersten Schritt wurde eine Polyurethanschicht zwischen zwei Objektträgern aus Glas mit der NMR-MOUSE PM 5 vermessen. Bild 4–18 zeigt den Aufbau des Probekörpers und die an der Probe gemessenen Tiefenprofile. Die Dicke des sensitiven Volumens entsprach mit $100\ \mu\text{m}$ der Schrittweite mit der das Tiefenprofil erstellt wurde. Die Echozeit betrug $0,038\ \text{ms}$, die repetition duration $0,3\ \text{s}$ und pro Messpunkt wurden 128 Scans durchgeführt. Entsprechend Bild 4–18 wurde die Schichtdicke der Polyurethanschicht bei der Hälfte der maximalen Signalintensität bestimmt, da an dieser Stelle das sensitive Volumen theoretisch zur Hälfte im Polyurethan liegt. Es wurden 10 Tiefenprofile von der Probe erstellt anhand derer jeweils die Ermittlung der Schichtdicken erfolgte.

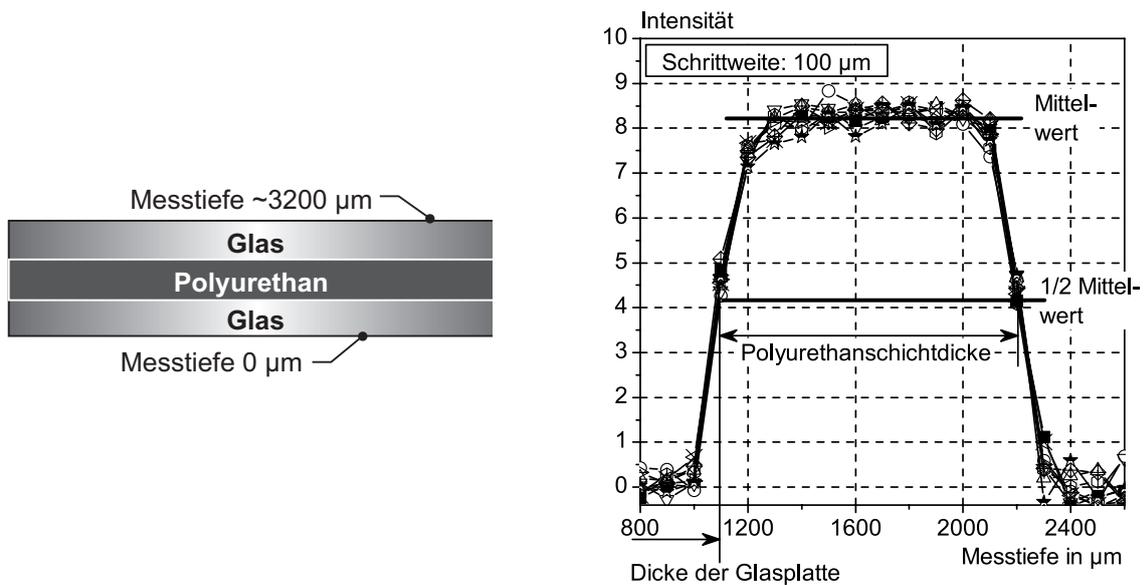


Bild 4–18: Links: Skizze des Probekörpers. Rechts: Tiefenprofil der links skizzierte Probe

Zur Betrachtung des Einflusses der Auflösung (d.h. der Dicke des sensitiven Volumens), wurden die Messungen mit sensitiven Volumendicken von 30 , 50 und $100\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Schrittweiten wurden den Dicken des sensitiven Volumens angepasst. In Tab. 4–4 sind die anhand der Tiefenprofile berechneten Schichtdicken als Mittelwerte inklusive Standardabweichung gegenübergestellt. Mit der PM 5 kann somit für dieses Polyurethan bei einer Schrittweite von $50\ \mu\text{m}$ eine Genauigkeit von $\pm 5\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Je kleiner das sensitive Volumen, umso kleiner wird die Signalintensität und je größer werden die Streuungen.

Die Dicke der beiden Glasplatten und der Gesamtprobe wurden zusätzlich mit einer Millitast Messuhr von Mahr ermittelt. Die durch Subtraktion der beiden Glasplatten von der Gesamtprobe ermittelte Dicke der Polyurethanschicht von $1102\ \mu\text{m}$ ist mit der Standardabweichung des Gesamtsystems ($12\ \mu\text{m}$, 13 Einzelwerte) und der Glasplatten ($5\ \mu\text{m}$, 10 Einzelwerte) behaftet. Im Mittel ist die mit der Messuhr bestimmte Dicke etwa $20\ \mu\text{m}$ geringer als die am Tiefenprofil berechnete Dicke. Dies kann jedoch auf Fehler in den Mess- und Auswerteverfahren zurückgeführt werden.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der NMR-Messtechnik hinsichtlich der Schichtdickenmessung bei Oberflächenschutzsystemen auf Beton, wurde das bereits mit Bild 4–8 beschriebene Modellsystem eingesetzt. Das Modellsystem besteht aus einer plan geschliffenen Betonplatte ($20 \times 20 \times 5\ \text{cm}^3$) mit selbstklebender PTFE-Folie und zwei Lagen Klebeband (herkömmliches Packband). Durch die Wahl der Klebebänder anstelle von Beschichtungsmaterialien wird die Streuung der Schichtdicke infolge

Applikation auf die Betonoberfläche eliminiert. Die Schichtdicke des PTFE-Folienklebers mit 75 μm entspricht nahezu der Mindestschichtdicke eines OS 2 bzw. OS 4, während das Klebeband mit rund 55 μm Schichtdicke noch unterhalb dieser Mindestwerte liegt.

Tab. 4-4: Dicke der Glasplatte und der Polyurethanschicht in Abhängigkeit von der Dicke des sensitiven Volumens (Mittelwert, Standardabweichung aus jeweils 10 Tiefenprofilen)

Schrittweite = Sensitive Volumendicke	Dicke der Polyurethanschicht	
	Mittelwert	Standardabweichung
	μm	
100	1122	4
50	1130	5
30	1121	20
Mahr Millitast Messuhr	1102	12 / 5

Die Untersuchungsergebnisse der Betonplatte mit dem Modellsystem sind in Bild 4-19 dargestellt. Bild 4-19, links, zeigt die mit einer sensitiven Volumendicke von 10 μm (Echozeit 0,136 ms, 8 Echos) gemessenen Profile. Auf der Betonschicht (Messtiefe $\sim 350 \mu\text{m}$) befindet sich der Kleber der PTFE-Folie, dann folgt die PTFE-Folie die kein Signal anzeigt und dann folgen zwei Peaks für die beiden Klebebänder. Der Abfall zwischen den beiden Peaks zeigt den inhomogenen Aufbau eines derartigen Klebebandes: Im Kleber befinden sich mehr Protonen als in der Folie des Klebebandes. Zudem können zwischen den beiden Klebebändern kleine Bereiche mit Lufteinschlüssen vorliegen.

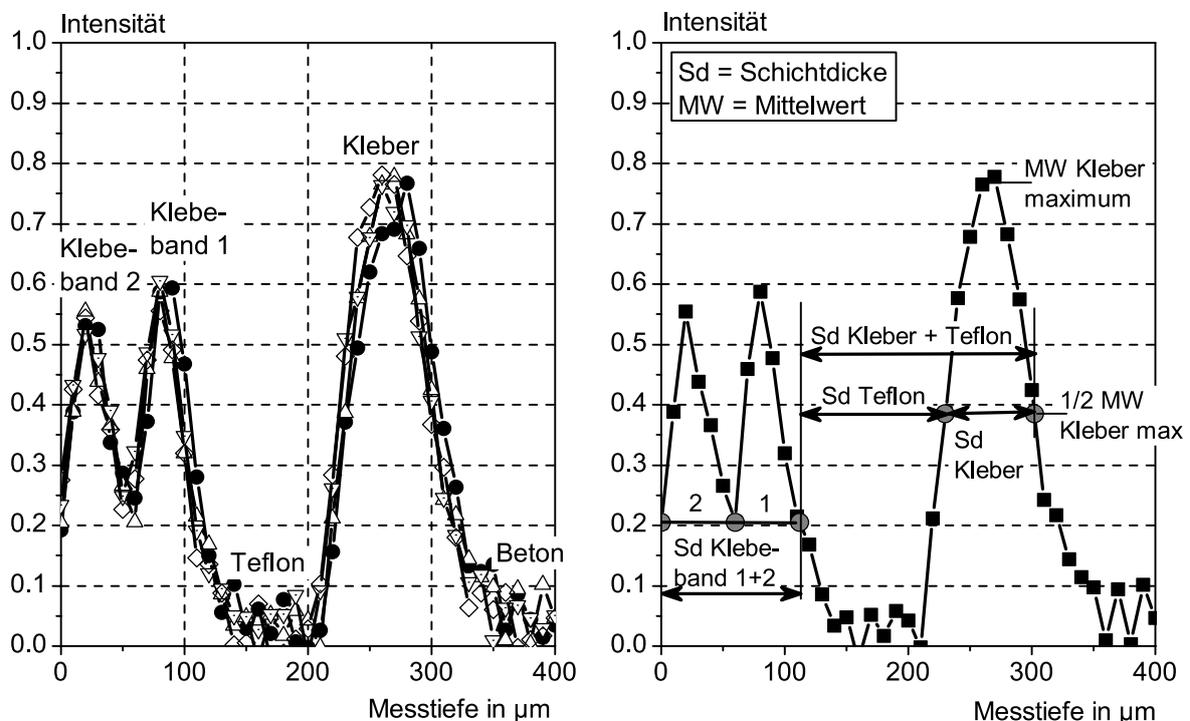
Bild 4-19, rechts verdeutlicht, wie die Schichtdicken des PTFE-Klebers, der PTFE-Schicht und der beiden Klebebänder anhand der NMR-Tiefenprofile ermittelt wurden. Die Schichtdicke des PTFE-Klebers wurde bei der Hälfte der maximalen Signalintensität bestimmt, da an dieser Stelle das sensitive Volumen zur Hälfte im Kleber liegt. Abweichend hiervon wurden die Schichtdicken der beiden Klebebänder an der minimal gemessenen Intensität der Folie des Klebebandes abgelesen, da sich zwischen den beiden Klebebändern kein weiteres Material, außer ggf. unplanmäßige Lufteinschlüsse, befand. Hätte man bei den beiden Klebebändern ebenfalls die Hälfte der maximalen Intensität gewählt, wären die Schichtdicken der Klebebänder jeweils rund 5 μm geringer. Zwischen den beiden Klebebändern wäre dann eine undefinierte „Luft/Kleberschicht“ von 5 μm . Die PTFE-Schicht wäre in diesem Fall etwa 2,5 μm dicker.

Die Messungen wurden ebenfalls mit einer sensitiven Volumendicke von 20 μm und einer Schrittweite von 20 μm (Echozeit 0,082 ms, 8 Echos) durchgeführt und entsprechend Bild 4-19, rechts, ausgewertet. Tab. 4-5 zeigt einen Vergleich der anhand der NMR-Tiefenprofile ermittelten Schichtdicken mit den am Mikroskop bestimmten Schichtdicken. Das Mikroskop hatte eine 125 fache Vergrößerung. Die dargestellten Messwerte stimmen unter Berücksichtigung der Standardabweichung überein. Im Rahmen der Standardabweichung würden die Werte auch noch übereinstimmen, wenn man für die Schichtdickenbestimmung der Klebebänder ebenfalls die Hälfte der maximalen Intensität gewählt hätte. Im Allgemeinen ist auch hier eine Zunahme der Streuungen mit der Verringerung des sensitiven Volumens zu erkennen.

Die beschriebenen Untersuchungen an dem Modellsystem, welches auf einer plan geschliffenen Betonoberfläche appliziert wurde, erlauben die Schlussfolgerung, dass bei entsprechend gleichmäßig aufgetragenen Schichten, Schichtdicken von 50 μm mit einer Standardabweichung von weniger als 5 μm messbar sind.

Tab. 4-5: Schichtdicken der Modell-Beschichtung (Mittelwerte aus 7 (Mikroskop, 125fache Vergrößerung) bzw. 4 Einzelwerten)

Schicht	Mikroskop		NMR-Schrittweite 10 μm		NMR-Schrittweite 20 μm	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
	μm					
Kleber	75,5	2,0	73,8	2,3	76,5	4,4
PTFE	119,3	10,9	118,5	0,9	118,2	3,0
Kleber + PTFE	195,0	9,2	193,7	2,7	194,7	2,0
Klebeband1	55,6	3,2	54,1	2,0	53,8	1,5
Klebeband2	55,8	4,2	54,6	4,9	53,7	0,6
Klebeband 1+2	111,0	7,3	108,8	2,9	107,6	1,0

**Bild 4-19:** Auswertung der NMR-Tiefenprofile an der Betonprobe mit Modell-Beschichtung (Bild 4-8) hinsichtlich Schichtdicken

4.5.3 SCHICHTDICKEN ZWEIER OS 11A-SYSTEME

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der NMR-MOUSE bei der Schichtdickenmessung an komplex aufgebauten Oberflächenschutzsystemen wurden zwei OS 11a Systeme untersucht. Die Materialzusammensetzung und der Schichtenaufbau der OS 11a Systeme waren bis auf die Deckversiegelung identisch. Es wurden zwei Betonplatten ($20 \times 20 \times 6 \text{ cm}^3$) beschichtet und die entnommenen Bohrkern e einerseits herkömmlich mittels Mikroskop und andererseits mit der PM 5 hinsichtlich ihrer Schichtdicken untersucht. Da die hierbei verwendete PM 5 nur Messtiefen bis 5 mm ermöglicht, wurden die Bohrkern e auf eine Höhe von knapp 1 cm abgesägt, um die beschichteten Beton-

scheiben beidseitig mittels NMR-MOUSE zu untersuchen. Entsprechend Bild 4–3 wurden jeweils die Probenoberflächen auf den Messtisch gelegt. Die gemessenen Tiefenprofile wurden anschließend in einem Diagramm zusammengefügt.

In Bild 4–20 und Bild 4–21 sind jeweils links die Mikroskopaufnahmen, an denen die Schichtdickenmessung durchgeführt wurde, und rechts die Tiefenprofile der PM 5 dargestellt. Die Dicke des sensitiven Volumens betrug ebenso wie die Schrittweite 100 μm (Echozeit 0,038 ms).

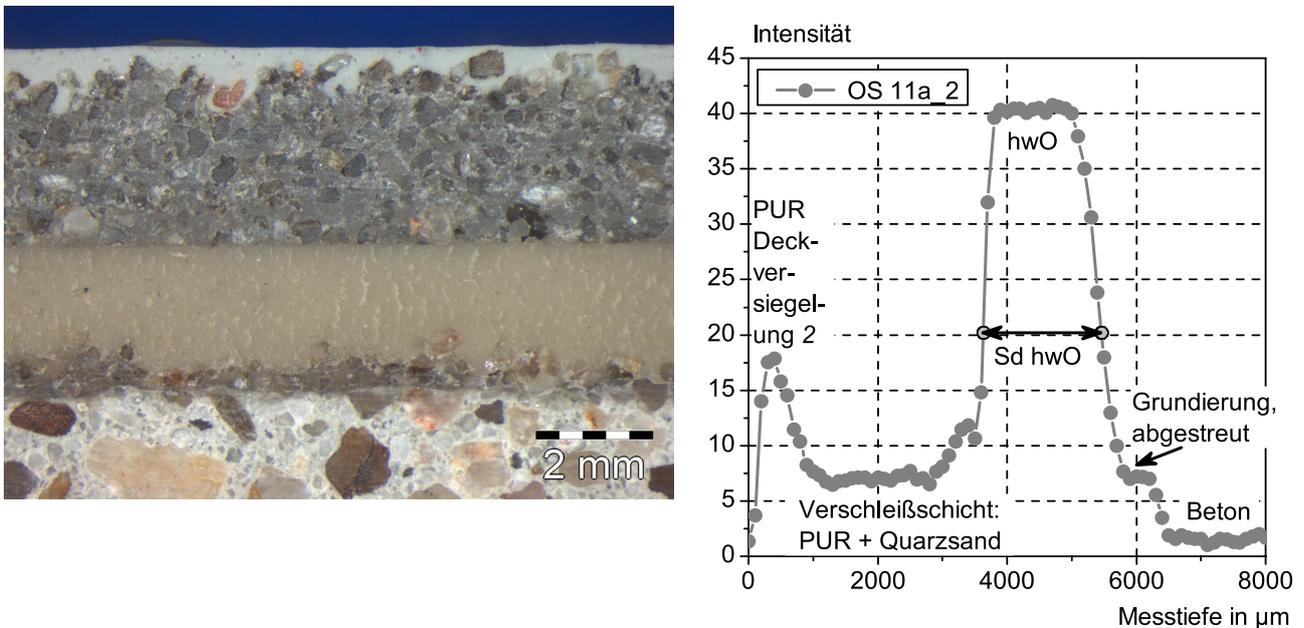


Bild 4–20: Links: Mikroskopaufnahme des OS 11a_2-Querschnitts. Rechts: Tiefenprofil der OS 11a_2 Probe

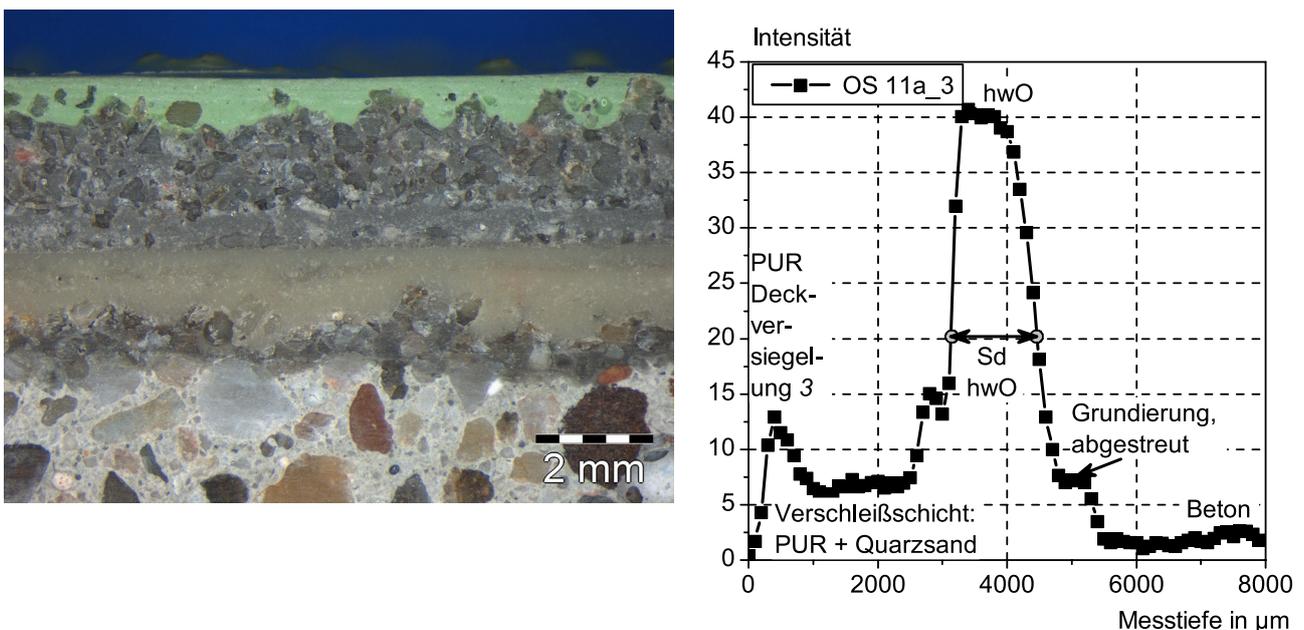


Bild 4–21: Links: Mikroskopaufnahme des OS 11a_3-Querschnitts. Rechts: Tiefenprofil der OS 11a_3 Probe

Die Schichtdicken der hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschichten (hwO) und Deckversiegelungen wurden wieder bei der Hälfte der jeweils maximalen Signalintensität bestimmt. Die maximalen Signalintensitäten sowie deren Mittelwert basieren jedoch auf der Signalintensität des Betons und nicht, wie bei den Glasplatten, auf den Wert 0. Die Dicke der abgestreuten Verschleißschicht ergibt sich aus der Differenz des ansteigenden Astes der hwO und des abfallenden Astes der Deckversiegelung. In Tab. 4–6 sind die mittels Mikroskop und Tiefenprofil der PM 5 ermittelten Schichtdicken gegenübergestellt. Aufgrund der Unebenheiten in den Schichten, die insbesondere aus den Abstreuerungen mit Quarzsand resultieren, ist die Streubreite in den Schichtdicken relativ groß. Unter Berücksichtigung dieser Streuungen ist die Übereinstimmung der beiden Messmethoden gut. Tendenziell bedingt die Berechnung der Tiefenprofile mit der PM 5 etwas höhere Gesamtschichtdicken. Mit dem Mikroskop wurde an 12 Positionen gemessen und der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Im Gegensatz zur punktuellen Messung beim Mikroskop erfasst das sensitive Volumen der NMR-MOUSE eine Fläche von 20 mm x 20 mm und bestimmt in diesem Bereich die Signalintensität. Aufgrund der Probenabmessungen war mit der NMR-MOUSE nur eine Einzelbestimmung möglich.

Tab. 4–6: Vergleich der an den Systemen OS 11a_2 und OS 11a_3 ermittelten Schichtdicken (Mikroskop: Mittelwert (MW) aus 12 Einzelwerten und Standardabweichung (Stabw), NMR-MOUSE PM 5, Einfachbestimmung)

Schicht	OS 11a_2			OS 11a_3		
	Mikroskop		PM 5	Mikroskop		PM 5
	MW	Stabw		MW	Stabw	
	mm					
Grundierung, abgestreut	0,58	0,18	0,85	0,60	0,12	0,95
HwO	2,04	0,13	1,81	1,44	0,15	1,32
Verschleißschicht, abgestreut	2,83	0,28	2,70	2,39	0,26	2,13
Deckversiegelung	0,61	0,31	0,78	0,49	0,24	0,76
Summe	6,06	0,16	6,14	4,92	0,15	5,16

Bild 4–22 zeigt den unmittelbaren Vergleich der zwei beschichteten Betonproben. Auf beiden Proben wurde die gleiche OS 11a Beschichtung aufgebracht – nur das Material der Deckversiegelung, mit den Nummern 2 bzw. 3 benannt, wurde verändert. Der zunehmende Polymergehalt bedingt eine Zunahme der gemessenen Intensitäten, wodurch eine Differenzierung zwischen den einzelnen Schichten möglich wird. Anhand Bild 4–22 und Tab. 4–6 wird deutlich, dass die hwO der Probe OS 11a-3 im Vergleich zur Probe OS 11a-2 eine deutlich geringere Schichtdicke aufweist. Die Schichtdicke wurde von rund 1800 µm auf rund 1300 µm reduziert. Die Dicke der Verschleißschicht ist beim OS 11a-3 im Vergleich zum OS 11a-2 ebenfalls geringer (Differenz ~600 µm). Anhand der unterschiedlichen Intensitäten in der Deckversiegelung kann der Materialwechsel für die Deckversiegelung deutlich detektiert werden.

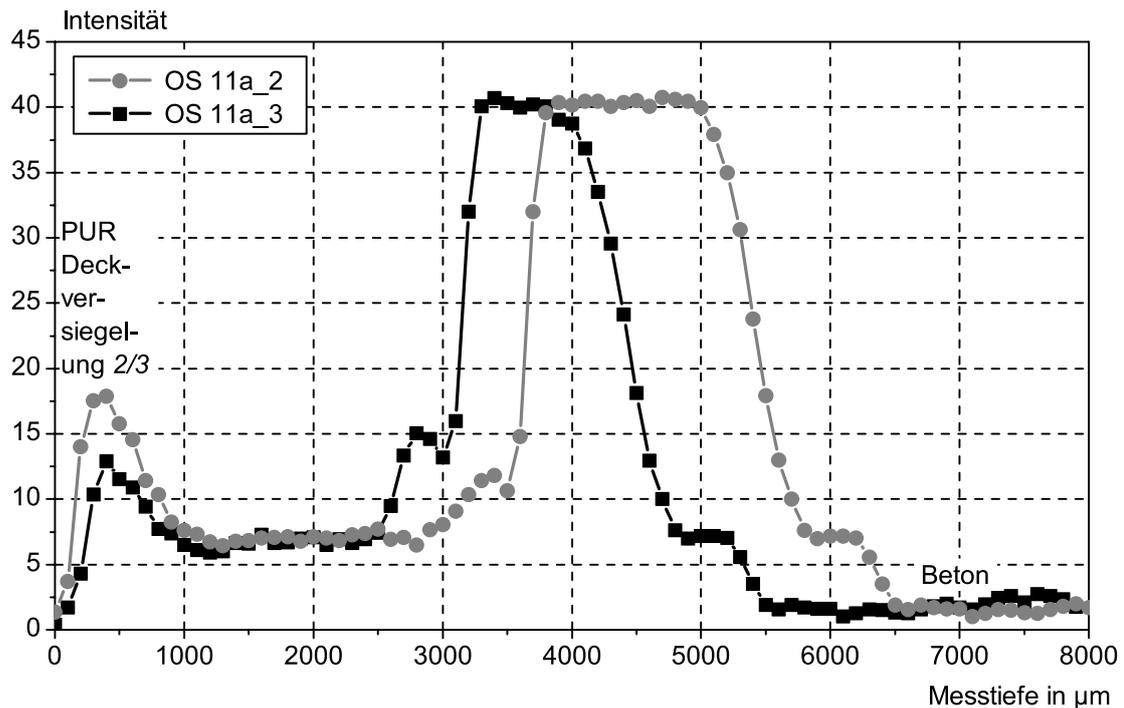


Bild 4–22: Vergleich der Tiefenprofile OS 11a_2 und OS 11a_3

4.5.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR MESSGENAUIGKEIT BEI DER SCHICHTDICKENBESTIMMUNG

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass mit der NMR-MOUSE die Schichtdicken von mehrschichtigen Systemen zerstörungsfrei bestimmt werden können. Dazu werden die ersten Echos der CPMG-Impulsfolge anhand Integral A der Gleichung 4–7 für die jeweiligen Messtiefen ausgewertet. Die so berechneten Signalintensitäten werden in einem Diagramm über die Messtiefe aufgetragen und anhand der unterschiedlichen Signalintensitäten der jeweiligen Schichten kann die Schichtdicke einzelner Schichten ermittelt werden. Die Genauigkeit der in dieser Form ermittelten Schichtdicken ist Abhängig von

- der Menge an Wasserstoff in den jeweiligen Schichten. Je mehr Wasserstoff desto höher ist die Signalintensität und je größer der Unterschied im Wasserstoffgehalt von zwei aufeinander folgenden Schichten, desto besser kann zwischen den Schichten differenziert werden.
- der Ebenheit der Probe sowie den einzelnen Schichten. Unebenheiten in den Schichten (z. B. durch Abstreuerung mit Quarzsand), die sich über mehrere gemessene Volumen erstrecken, bedingen im Tiefenprofil Übergangsbereiche zwischen den jeweiligen Schichten.
- der Probenausrichtung zum Magneten. Zur Vermeidung von Messfehlern ist eine parallele Ausrichtung zum Magnetfeld erforderlich.
- Temperaturschwankungen. Verändert sich die Temperatur des Magneten während der Erstellung eines Tiefenprofils, wird das Tiefenprofil verzerrt.
- der Vorgehensweise bei der Berechnung der Schichtdicken. In den hier gezeigten Beispielen wurde linear zwischen zwei Messpunkten interpoliert, um die Messtiefe für den Beginn einer neuen Schicht zu bestimmen. Die zwei Messpunkte befanden sich jeweils ober- oder unterhalb der mitt-

leren Signalintensität einer Signaldifferenz von zwei aufeinander folgenden Schichten.

Anhand der zuvor erläuterten Messungen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen der Schichtdickenbestimmung mittels Mikroskop und der Schichtdickenberechnung anhand der NMR-Tiefenprofile festgestellt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Schichtdickenberechnung aus den Tiefenprofilen tendenziell gegenüber den Mikroskopwerten etwas größere Werte ergeben. Die Differenzen liegen jedoch noch im Rahmen der Standardabweichungen der Mikroskopmessungen. Bei entsprechend gleichmäßig aufgetragenen Schichten und deutlich unterschiedlichen Wasserstoffgehalten in den einzelnen Schichten sind Schichtdicken von 50 μm mit einer Standardabweichung von weniger als 5 μm messbar.

5. NICHT BEFAHRBARE OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

5.1 ALLGEMEINES

Die in der RL-SIB geregelten Oberflächenschutzsysteme können in nicht befahrbare und befahrbare Systeme unterteilt werden. Zu den nicht befahrbaren Systemen gehören Oberflächenschutzsysteme die aus Dispersionen aufgebaut sind (OS 2, OS 4, OS 5a). Das OS 5b System ist ebenfalls nicht befahrbar, es besteht allerdings aus einem Polymer-Zement-Gemisch, einer so genannten elastischen Dichtungsschlämme. Betone mit Hydrophobierungen (OS 1) werden zum Teil, insbesondere in den Niederlanden und in Skandinavien, befahren - dennoch sind sie Bestandteil dieses Abschnittes. Die Systeme sind in Bild 2-17 bis Bild 2-19 dargestellt.

Die genannten Systeme wurden und werden umfangreich im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten innerhalb der ibac-Arbeitsgruppe „Erhaltung und Instandsetzung“ untersucht. Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse dieser bis zu 12 Jahre andauernden Versuchsreihen erläutert. Im Abschnitt 5.2 werden die Hydrophobierungen behandelt, danach folgen im Abschnitt 5.3 die Oberflächenschutzsysteme auf Dispersionsbasis. Abschnitt 5.4 beinhaltet elastische Dichtungsschlämmen.

5.2 HYDROPHOBIERUNGEN

5.2.1 ALLGEMEINES

Hydrophobierungen sollen entsprechend Bild 2-16 in den Beton eindringen, ohne an der Oberfläche eine sichtbare Schicht zu bilden. Die heute überwiegend für Beton eingesetzten Stoffe gehören zu der Stoffgruppe der Silane und Siloxane. Der Aufbau dieser siliciumorganischen Verbindungen aus dem Grundstoff Chlorsilan und das Wirkprinzip sind in Abschnitt 2.4.3 beschrieben.

Zur Verdünnung der Produkte wird entweder Lösemittel, wie z. B. Ethanol, Isopropanol, oder Wasser zugegeben (Abschnitt 2.4.3). Damit wird einerseits die Viskosität gesenkt und andererseits die Wirkstoffmenge reduziert. Seit einigen Jahren sind jedoch auch gezielt eingestellte hochviskose, teilweise thixotrope Silane mit Wirkstoffgehalten bis zu 100 % auf dem Markt. Hierbei handelt es sich um so genannte Cremes und Gele.

Nach dem Auftrag der Hydrophobierungsmittel auf die Bauteiloberfläche wird der Wirkstoff durch

kapillares Saugen in den Baustoff transportiert. In den Kapillaren beginnt die chemische Reaktion des Wirkstoffes zu einem wasserabweisenden Silikonharz. Damit das Eindringen in den Baustoff mittels kapillaren Saugens möglich ist, dürfen die Poren in dem Baustoff nicht wassergesättigt sein.

Die Reaktionsgeschwindigkeit wird durch mehrere Faktoren wie Feuchtegehalt, Temperatur, pH-Wert der Porenflüssigkeit im Beton sowie Molekülgröße und -struktur der Hydrophobierung bestimmt. Die Reaktion dauert zwischen wenigen Stunden und einigen Tagen.

Die wasserabweisende Wirkung von Hydrophobierungen verhindert bzw. verringert die kapillare Wasseraufnahme von Betonoberflächen. Dadurch wird u. a. der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand des Bauteils erhöht und der Eintrag in Wasser gelöster Substanzen, wie z. B. Chloride, verringert. Bild 5–1 zeigt einen Wassertropfen auf einer nicht hydrophoben und einer hydrophoben Oberfläche. Ist die Oberfläche hydrophob, perlt der Tropfen von der Oberfläche ab.

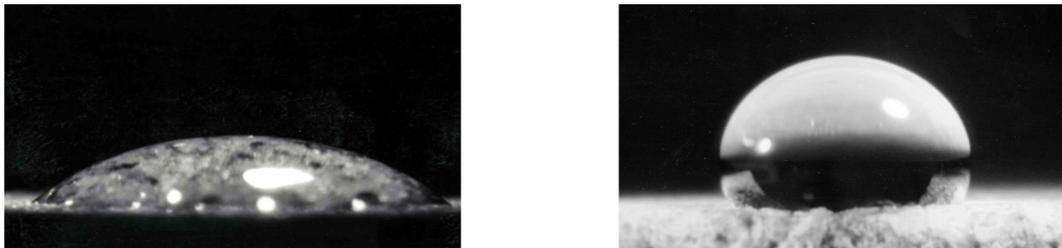


Bild 5–1: Verhalten eines Wassertropfens auf einer nicht hydrophoben (links) und einer hydrophoben Oberfläche (rechts)

Die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben am ibac in den letzten 12 Jahren auf Betonoberflächen untersuchten Hydrophobierungen sind in Tab. 5–1 zusammengefasst.

Tab. 5–1: Überblick über die untersuchten Hydrophobierungen

Kürzel	Beschreibung Hydrophobiermittel	Wirkstoff	Wirkstoffgehalt
H1	wäßriges, lösemittelfreies, cremeförmiges Hydrophobiermittel auf Silanbasis	Octyltriethoxysilan	80 %
H2	lösemittelfreies, monomeres Alkyltrialkoxysilan	Isobutyltriethoxysilan	98 %
H3	lösemittelfreies Silicon-Microemulsionskonzentrat auf Silan/Siloxan Basis	Alkylsiliconharz mit Alkoxygruppen	100 %, mit Wasser auf 20 % verdünnt
H4	wässrige, lösemittelfreie, Hydrophobieremulsion eines Silans	Octylsilan	60 %, mit Wasser auf 40 % verdünnt
H5	Unverdünntes Silan, Verdünnung mit Lösemittel Isopropanol bzw. Ethanol	Isobutyltrimethoxysilan	96 %, mit Ethanol auf 40 % verdünnt
H6	Unverdünntes Silan, Verdünnung mit vorgesäuertem Wasser (pH 4) bis zur Klärung der Lösung	Methyltrimethoxysilan	98 %, bis zur Klärung verdünnt
H7	Unverdünntes Silan, Verdünnung mit Lösemittel Isopropanol bzw. Ethanol	N-Octyltriethoxysilan	98 %, mit Ethanol auf 40 % verdünnt
H8	Thixotrope Silanemulsion	Octyltriethoxysilan	80 %
H9	Unverdünntes Alkoxysilan, Verdünnung mit Lösemittel, hier Dodecan	Trimethoxy(2-methylpropyl)silan, Oligomere aus Isobutylmethoxysilane	98 % (96 % Trimethoxysilan)

Die eingesetzten Betone sind in Tab. 5–2 dargestellt. Die Applikationsmengen wurden zwischen 60 und 200 g/m² variiert. Die Applikation erfolgte mit einem Pinsel bei 23 °C und 50 % r. F.

Tab. 5–2: Betonuntergründe, die für die Untersuchung der Hydrophobierungen verwendet wurden

Bezeichnung	Zementart	Zementgehalt	w/z-Wert	Sieblinie
-	-	kg/m ³	-	-
C 12/15	CEM I 32,5R	270	0,75	B/C 32
C 20/25	CEM I 32,5R	300	0,7 bzw. 0,6	A/B 32 bzw. A/B16
C 30/37	CEM I 32,5R	300	0,57	A/B 16
C 35/45	CEM I 32,5R	300	0,6	A/B 16
C 35/45 III	CEM III 32,5R	300	0,6	A/B 16
C (0,40)	CEM I 42,5	425	0,4	A/B 16
C (0,70)	CEM I 42,5	275	0,7	A/B 16

5.2.2 EINDRINGTIEFE

Zur Gewährleistung einer langfristigen wasserabweisenden Wirkung sind die eingetragene Wirkstoffmenge und die Eindringtiefe des Wirkstoffes von entscheidender Bedeutung. Die Eindringtiefe hängt von einer Vielzahl von Faktoren, wie Art des Hydrophobierungsmittels, Betonuntergrund, Untergrundfeuchte, Applikationstechnik und Nachbehandlung, ab. Hierzu wurden und werden zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt /Lit01/, /Mei02/, /Ger02/, /Wit04/, /Sil05/, /Oeh07/.

Die mittlere Eindringtiefe einer korrekt durchgeführten Hydrophobierung einer Betonoberfläche beträgt etwa 5 mm bis 10 mm, wobei dies aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen nur ein Anhaltswert ist. Bild 5–2 zeigt beispielhaft die Eindringtiefe unterschiedlicher Hydrophobierungen in verschiedene Betonuntergründe. Die Hydrophobierungen sind in Tab. 5–1 und die Betonuntergründe in Tab. 5–2 spezifiziert. Der Beton lagerte vor der Applikation über mindestens drei Monate bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte. Die Eindringtiefe wurde an gespaltenen Betonproben an jeweils fünf Stellen gemessen. In Bild 5–2 sind jeweils die Mittelwerte aus fünf Messwerten dargestellt.

Mit der NMR-MOUSE kann nun die Eindringtiefe auch zerstörungsfrei bestimmt werden. Hierbei gibt es zwei Varianten. Zum einen kann das Eindringen der Hydrophobierung kurz nach der Applikation des Materials auf die Betonoberfläche mit der NMR-MOUSE verfolgt werden. Diese Möglichkeit besteht während der chemischen Reaktion des Materials. Zum anderen kann Wochen bis Jahre nach der Applikation die Eindringtiefe der Hydrophobierung indirekt anhand von NMR-Messungen bestimmt werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Betonprobe wassergesättigt ist. Über die Bestimmung der Protonen des Wasserstoffs über die Probentiefe kann dann im Umkehrschluss auf die Wirkzone der Hydrophobierung geschlussfolgert werden. Die Arbeiten werden aktuell von Herrn Antons im Rahmen seiner Dissertation (DFG-Forschungsvorhaben „Zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen auf Beton“) durchgeführt.

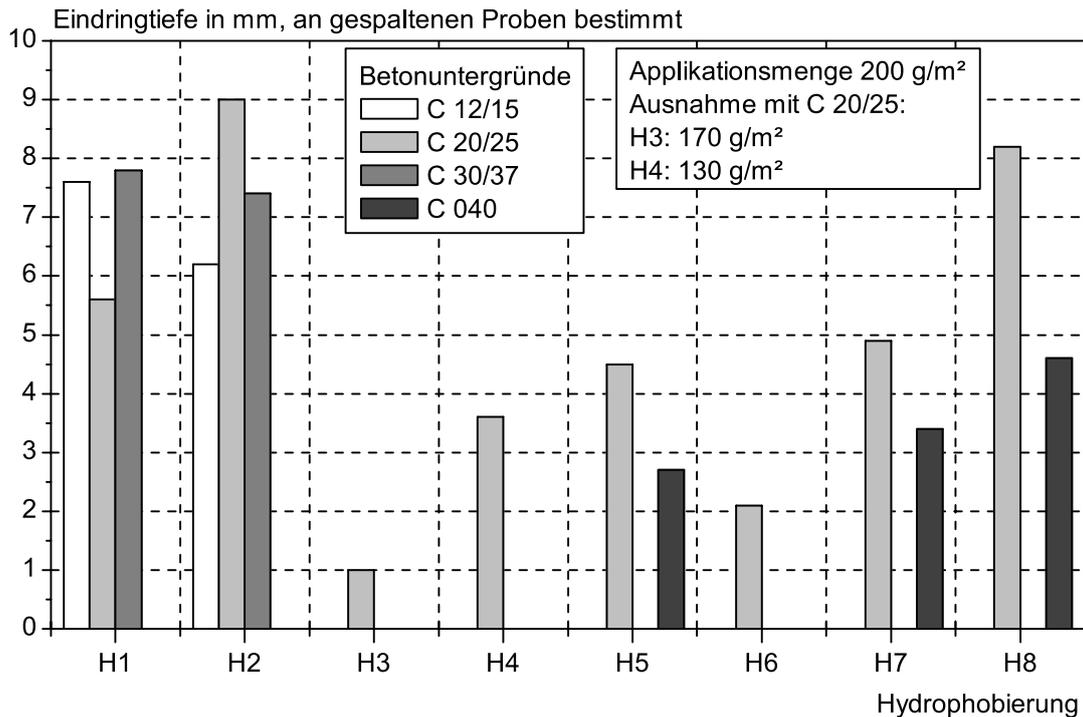


Bild 5–2: Eindringtiefe unterschiedlicher Hydrophobierungen in verschiedene Betone

Bild 5–3 zeigt exemplarisch für die Hydrophobierung H9 auf Beton C 35/45 die Möglichkeiten der NMR-MOUSE hinsichtlich der Detektion hydrophobierter Betonbereiche. Zunächst wurde hierzu der noch nicht hydrophobierte Beton im trockenen (23 °C / 50 % r. F.) und im wassergesättigten Zustand gemessen. Die ermittelten Intensitäten ergeben sich aus dem Integral der ersten 5 Echos (Bestimmung von A nach Gleichung 4–7). Die Intensitäten wurden mit einer Schrittweite von 500 µm bis in eine Tiefe von 10,5 mm bestimmt. Nach der Probenkonditionierung bei 23 °C und 50 % r. F. erfolgte die Hydrophobierung der Betonoberfläche. Unmittelbar nach der Applikation der Hydrophobierung wurde das NMR-Tiefenprofil erneut bestimmt und anhand der höheren Intensitäten an der Probenoberfläche sowie die Abnahme der Intensitäten mit zunehmender Probentiefe ist das Eindringen des Mittels deutlich zu erkennen. Nach einer 7tägigen Lagerung im Laborklima ist die chemische Reaktion des Hydrophobierungsmittels augenscheinlich abgeschlossen, da die Signalintensität wieder auf dem Niveau des trockenen Betons liegt. Im Anschluss an diese 7tägige Wartezeit erfolgte die Lagerung der hydrophobierten Probe im Wasser über 5 Tage. Das danach bestimmte NMR-Profil zeigt, dass die Probe ab einer Tiefe von 8 mm erneut wassergesättigt ist, während bis zu einer Tiefe von 6 mm die Intensitäten nur marginal gegenüber dem trockenen Beton angestiegen sind. Die Wirkung der Hydrophobierung lässt offensichtlich in einer Tiefe von 6 bis 8 mm sukzessive nach, die Intensitäten steigen an.

Bild 5–3 verdeutlicht somit, dass zum einen unmittelbar bis einige Tage nach der Applikation der Hydrophobierung die Eindringtiefe anhand NMR-Tiefenprofile zu detektieren ist. Der Zeitraum hängt von der chemischen Reaktivität des Materials ab. Zum anderen kann jedoch auch indirekt über eine Wassersättigung des Betons die Wirksamkeit der Hydrophobierung ermittelt werden. Damit ist es erstmals auch möglich den Einfluss unterschiedlicher Bewitterungen auf die hydrophobe Schicht in Abhängigkeit von der Betontiefe zu analysieren. In seiner Dissertation wird Herr Antons diese Methode anwenden, um konkretere Aussagen zur Dauerhaftigkeit hydrophobierter Betonoberflächen treffen zu können.

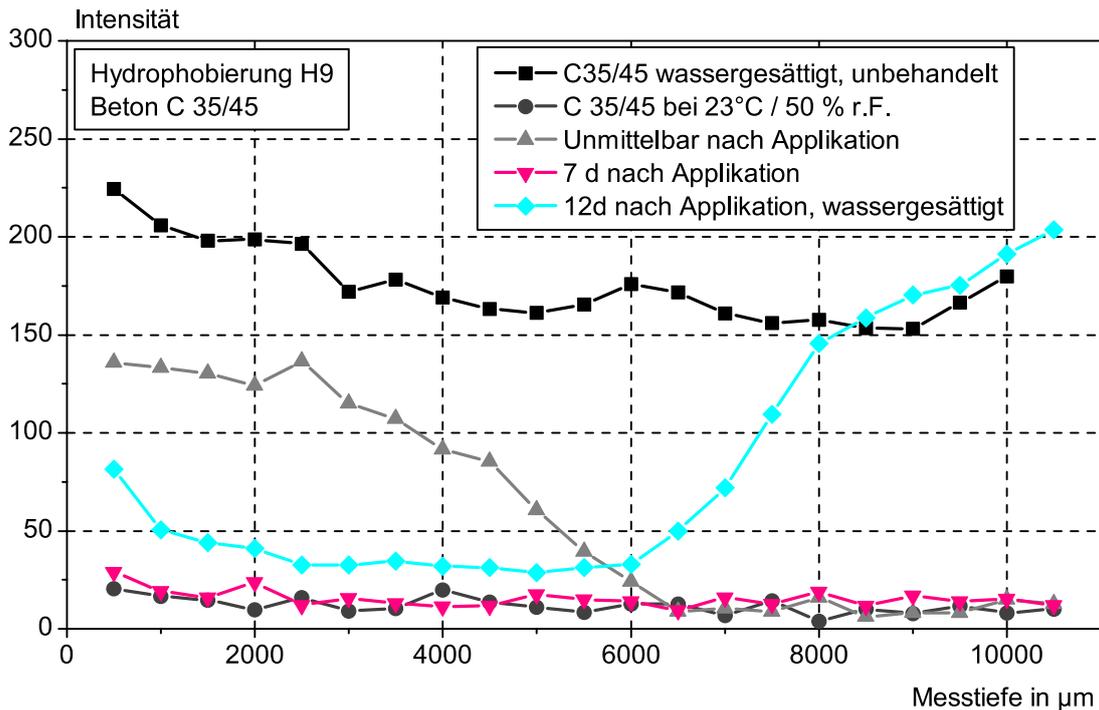


Bild 5-3: Eindringen einer Hydrophobierung in den Beton unmittelbar nach der Applikation und indirekter Nachweis einer hydrophobierten Betonoberfläche. Messungen mit der NMR-MOUSE PM 25

Mittels FT-IR Spektroskopie (Fourier-Transformations-Infrarot Spektroskopie) kann die Verteilung des Wirkstoffes in der Betonrandzone nach dem Ausreagieren des Silanes zum Silikonharz bestimmt werden /Ger02/. Dabei wurde festgestellt, dass von der Oberfläche ausgehend zuerst eine Zone mit weniger Wirkstoff und daran anschließend, häufig in 2 bis 5 mm Tiefe, ein so genannter „Katzenbuckel“ auftritt, bei dem die größte Wirkstoffkonzentration gemessen wird. Daran schließt sich der Bereich mit bis auf Null auslaufender Wirkstoffkonzentration an /Wit01/. Dies bestätigt den generellen Kurvenverlauf der hydrophobierten, wassergesättigten Probe in Bild 5-3. An der Oberfläche, bis in einer Tiefe von 2 mm, ist die gemessene Intensität an Protonen des Wasserstoffs gegenüber der Tiefe von 2 bis 6 mm erhöht.

Dass es sich hierbei um eine zeitabhängige Umverteilung handelt, wurde von /Wit01/, /Mei02/ mittels Neutronenradiographie gezeigt. Mit Hilfe der Neutronenradiographie kann die zeitliche Entstehung erfasst werden. Bild 5-4 zeigt, dass dieser „Katzenbuckel-Effekt“ nur bei nicht abgedeckten Proben ausgeprägt auftritt. Erklären lässt sich das mit dem hohen Anteil an Wirkstoff, welcher sich nach der eigentlichen Applikation an der Oberfläche verflüchtigt. Weiterhin verdeutlicht Bild 5-4, dass die Eindringtiefe durch das Abdecken der Proben erhöht wird. In diesem Fall wurden Mörtelproben mit 4 mm Größtkorn und einem w/z-Wert von 0,45 anhand einer Kontaktzeit über vier Stunden mit Silan hydrophobiert. Mittels wiederholten NMR-Messungen nach Applikation des Wirkstoffs bis zum Abschluss der chemischen Reaktionen, ist auch mit der NMR-MOUSE diese zeitabhängige Umverteilung des Wirkstoffs zu beobachten /Ant12/.

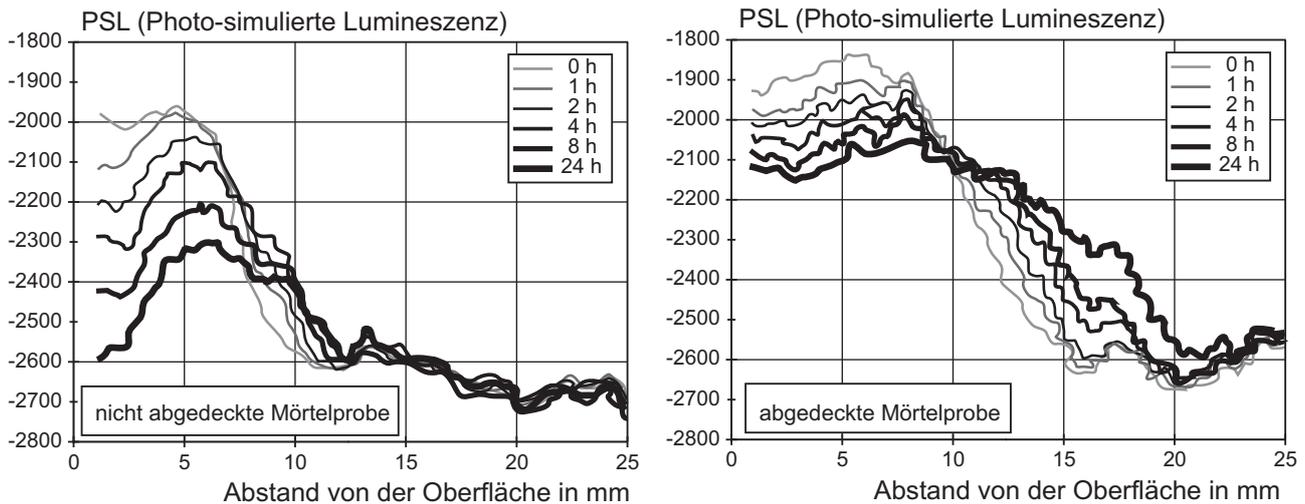


Bild 5-4: Zeitliche Entwicklung der Wirkstoffverteilung in einer nicht abgedeckten (links) und einer abgedeckten (rechts) Mörtelprobe /Wit01/

5.2.3 DAUER DER WIRKSAMKEIT VON HYDROPHOBIERUNGEN

ÜBERSICHT

Im überwiegenden Teil der Fachliteratur zum Thema „Hydrophobierungen auf Beton“ wird postuliert, dass die Dauer der Wirksamkeit von Hydrophobierungen zeitlich begrenzt und in den meisten Fällen die Lebensdauer des Bauwerkes weitaus größer sei als die einer Hydrophobierung /Mei02/. Eine gängige Zeitspanne zwischen dem Aufbringen der Hydrophobierung und dem Verlust an Wirksamkeit wird mit 10 Jahren angegeben, wobei genaue Angaben zur Exposition, Art der Hydrophobierung und Applikation fehlen. Die bei den Fassadenelementen des Olympischen Dorfes in München eingesetzte Hydrophobierung zeigte beispielsweise nach ca. 10 Jahren Freibewitterung noch keine Alterungserscheinungen. Die Hydrophobierung der Kaimauer des Containerhafens Zeebrugge wies nach 12 Jahren keine Alterungserscheinungen auf /Schu99/, /Schu08/, /Mül93/, /Lit02/. In /Mei02/ werden Lebensdauerangaben aus Schweden zwischen 20 und 25 Jahren zitiert. Die fehlenden systematischen Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen werden zur Zeit am ibac erforscht. Folgende Mechanismen können bei der Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen eine wesentliche Rolle spielen:

- Veränderung des Porengefüges des Betons in Abhängigkeit des Bindemittels aufgrund von Hydratation und Karbonatisierung.
- Die Alkalität der Porenlösung, welche bei der Reaktion der Hydrophobierung eine wesentliche Rolle spielt, kann die Lebensdauer des ausreagierten Siliconharzes negativ beeinträchtigen.
- UV-Licht dringt zwar nur begrenzt in den Beton ein, kann aber in diesem Bereich die siliciumorganischen Verbindungen in gewissem Umfang abbauen und die wasserabweisende Wirkung negativ beeinflussen.
- Besonders bei Außenbauteilen unter intensiver Sonneneinstrahlung kann möglicherweise die hohe Oberflächentemperatur zum Abbau der siliciumorganischen Verbindungen führen.
- Das Eindringen von hydrophilen Stoffen, wie Staub, in das Porensystem kann den hydrophoben Film belegen und so die Wirkung der Hydrophobierung herabsetzen.

- Eine Beaufschlagung mit Druckwasser kann ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der hydrophoben Wirkung führen.

Neben diesen von dem Alter und der Exposition des Betons abhängigen Faktoren gibt es noch weitere Einflüsse. Ein Einfluss ist die Abrasion der Oberfläche, welche die wirksame hydrophobe Schicht kontinuierlich reduziert.

Eine andere Ursache für den Verlust der hydrophoben Wirkung ist die Entstehung von Mikro- und Makrorissen. Zu hydrophobierende bzw. bereits hydrophobierte Oberflächen sollten nur Risse mit einer Rissbreite unterhalb von etwa 0,1 mm aufweisen. Dies gilt insbesondere für alte Betonbauwerke mit minderer Betonqualität.

Es gibt jedoch auch Ansätze ggf. zulässige Rissbreiten in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Hydrophobierungsmittel /Wit04/ sowie auftretenden Windgeschwindigkeiten /Gis99/ zu berechnen. Die kritische Rissbreite, ab der die Risse vor der Hydrophobierung zu schließen sind, muss demnach im Einzelfall festgelegt werden. Dies sollte unter Berücksichtigung der Möglichkeiten einer Rissbehandlung und der Konsequenzen eines eventuellen Versagens der Hydrophobierung im Rissbereich entschieden werden.

WIRKSAMKEIT BEI EINPARAMETRIGER LABORBEWITTERUNG

5

Zur Ermittlung möglicher Ursachen für die langfristige Abnahme der Wirkung hydrophober Betonoberflächen, ist die Betrachtung einzelner Parameter sinnvoll. Entsprechend der vorangegangenen Aufzählung wurden hierzu zunächst die Einflussgrößen alkalisches Milieu, Karbonatisierung und UV-Licht separat betrachtet /Büt08/. Bild 5–5 und Bild 5–6 zeigen Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Die eingesetzten Hydrophobierungen sind in Tab. 5–1 erläutert, als Beton kam ein C 20/25 entsprechend Tab. 5–2 zur Einsatz. Der Beton hatte einen w/z-Wert von 0,6 und die Sieblinie A/B 16. Infolge der vorangegangenen 6monatigen Lagerung des Betons bei 23 °C und 50 % r. F. war die Betonoberfläche etwa 8 mm tief karbonatisiert. Bis auf eine Ausnahme erfolgte die Hydrophobierung des karbonatisierten Betons. Diese Proben wurden danach 28 Tage im Laborklima, 28 Tage im UV-Licht sowie 35 Tage in alkalischer Lösung gelagert. Zur Betrachtung des Karbonatisierungseinflusses anhand einer Lagerung über 35 Tage bei 2 Vol.-% CO₂, wurden nicht karbonatisierte Betonbereiche hydrophobiert. Nach den jeweiligen Lagerungen wurde die kapillare Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 bestimmt. Um einen eindimensionalen Wassertransport in den Proben sicherzustellen, wurden die Proben an die Flanken mittels Wachs versiegelt und mit der hydrophobierten Fläche ca. 5 mm tief ins Wasser gestellt. Die Wasseraufnahme der Proben wurde über insgesamt 48 h aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte die Ermittlung der Randwinkel von auf die Betonoberfläche aufgesetzten Wassertropfen entsprechend Bild 2–7.

Bild 5–5 verdeutlicht, dass der Randwinkel bei den Hydrophobierungen H5 bis H7 infolge der UV-Bewitterung abnimmt. Der Einfluss der UV-Bewitterung und Karbonatisierung auf die Wasseraufnahme (Bild 5–6) spiegelt nicht vollständig die Ergebnisse der Randwinkeluntersuchungen wider: Die UV-Bewitterung bedingt eine erhöhte Wasseraufnahme bei den Produkten H6 und H7. Bei den Produkten H5, H6 und H7 erhöht eine Karbonatisierung ebenfalls die Wasseraufnahme.

Die Betrachtung der Ergebnisse (Randwinkel und Wasseraufnahme) zeigt, dass die Messmethoden keine vergleichbaren Resultate liefern. Der Randwinkel erlaubt nur Aussagen zum Abperleffekt von Wassertropfen, hierüber kann keine Aussage zur lokalen Schädigung der Hydrophobierung im Porensystem getroffen werden.

Mit der Wasseraufnahme-Prüfung nach Karsten ist zwar am Bauwerk die Wasseraufnahme des hyd-

rophobierten Betons bestimmbar, diese Werte liefern jedoch lediglich eine Aussage zur momentanen Wirkung der Hydrophobierung. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen besteht die Notwendigkeit einer alternativen Methode, der NMR-MOUSE.

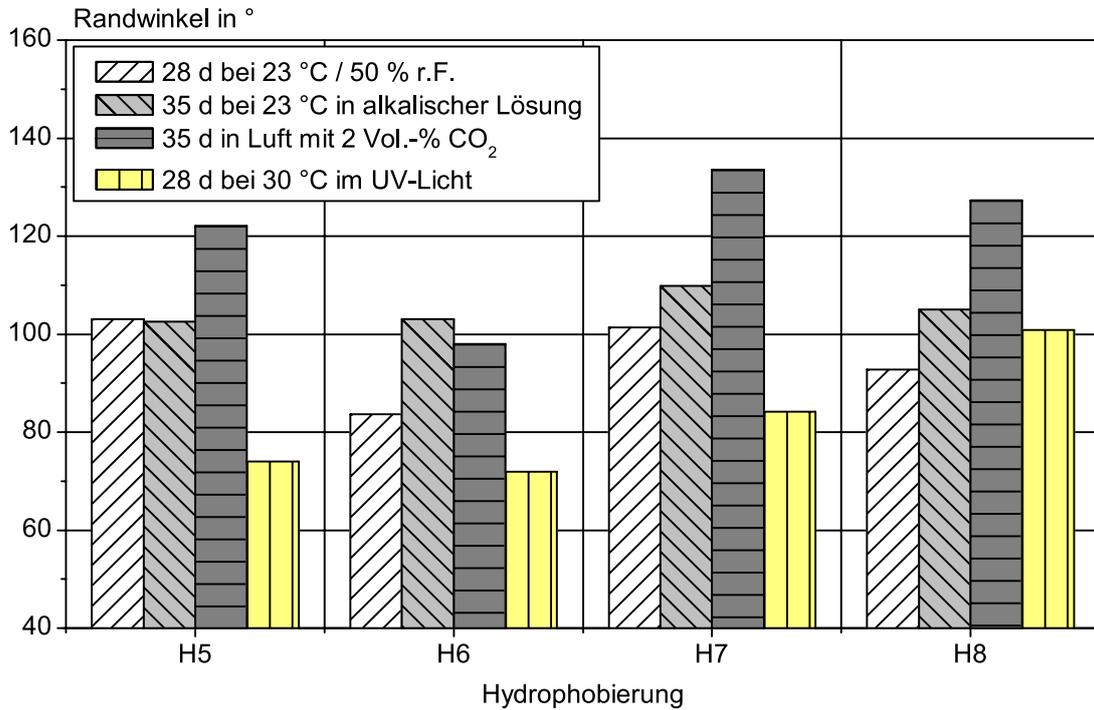


Bild 5-5: Randwinkel auf Beton C 20/25, behandelt mit unterschiedlichen Hydrophobierungen, nach verschiedenen Lagerungen. Auftragsmenge 200 g/m²

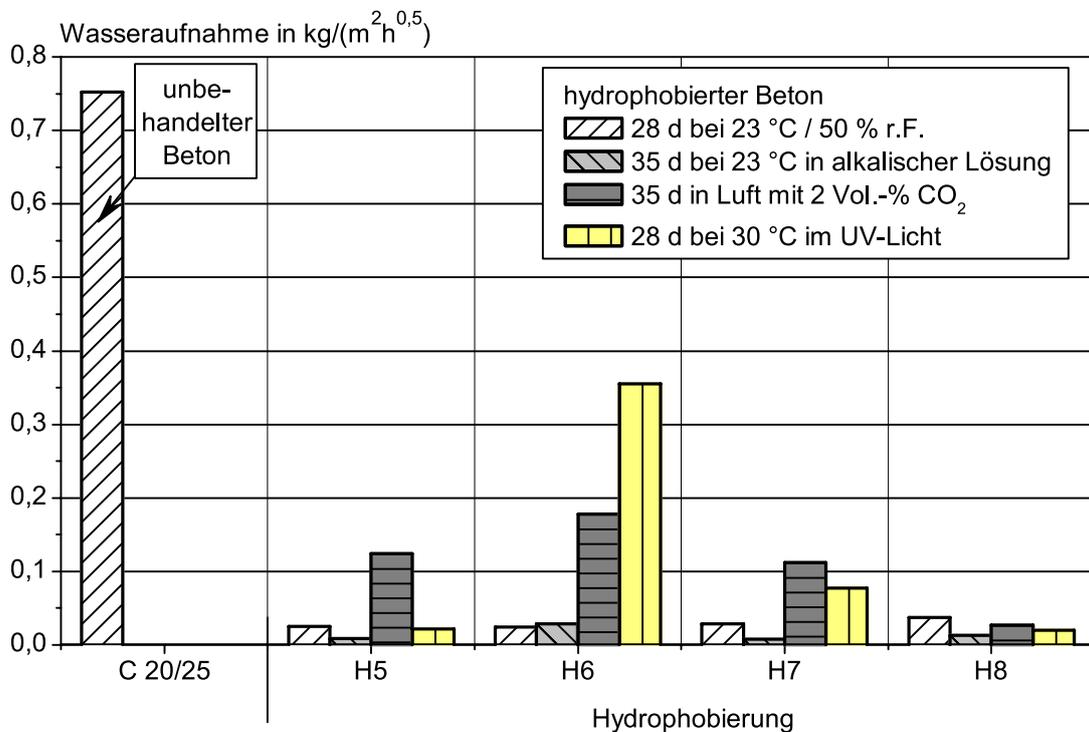


Bild 5-6: Wasseraufnahme eines Betons C 20/25, behandelt mit unterschiedlichen Hydrophobierungen, nach verschiedenen Lagerungen. Auftragsmenge 200 g/m²

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Veränderung des Porenraums infolge Karbonatisierung bei drei von vier Hydrophobierungen zu einer Abnahme der Wirksamkeit führt. Dieser Sachverhalt wird Momentan im Rahmen des bereits erwähnten DFG-Forschungsvorhabens (Dissertation Herr Antons) weitergehend betrachtet. Einzig die Hydrophobierung H8 zeigte in den Untersuchungsreihen keinerlei Veränderungen in der Wirksamkeit. Hierbei handelt es sich um das Produkt mit dem höchsten Wirkstoffgehalt.

WIRKSAMKEIT BEI MEHRPARAMETRIGER BEWITTERUNG

Mittels einparametrischer Beanspruchung sind Einflussgrößen auf die Wirksamkeit hydrophobierter Betonoberflächen zwar eindeutig herauszuarbeiten, aber der Bezug zur Realität geht verloren. Somit sollten diese einparametrischen Beanspruchungen durch mehrparametrische Beanspruchungen begleitet werden. Hierfür steht zum einen die Freibewitterung und zum anderen die komplexe Laborbewitterung entsprechend Abschnitt 3.4.2 zur Verfügung.

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung geförderten Forschungsvorhabens wurden hydrophobierte Betonproben sowohl in der VENUS als auch auf einem Garagendach auf dem Gelände des ibac bewittert */Rau02/*. In der VENUS kamen die in Bild 3–11 und Bild 3–12 dargestellten Zyklen zum Einsatz. VENUS-Zyklus-1 hatte eine Länge von 24 Stunden und wurde dreimal wiederholt, VENUS-Zyklus-2 dauerte 48 Stunden und wurde zweimal wiederholt. Somit ergab sich ein Wochenrhythmus mit einer Gesamtlänge von 168 Stunden. Zur Freibewitterung in Aachen wurden die Probekörper auf einer Holzpalette, die eine Neigung um etwa 20 ° Richtung Süden aufwies, positioniert.

Veränderungen in der Wirksamkeit der hydrophobierten Betonoberfläche während der Bewitterung wurden mittels in den Betonkörpern eingebauten Multiringelektroden erfasst. Bild 5–7 zeigt den Aufbau und das Messprinzip der Multiringelektrode.

Mittels der Multiringelektrode ist es möglich bis in einer Bauteiltiefe von 42 mm in acht verschiedenen Tiefen die lokale Feuchte indirekt über Widerstandsmessungen zu bestimmen. Der am ibac entwickelte Sensor besteht aus abwechselnd übereinander liegenden Edelstahl- und Kunststoffringen. Der elektrische Anschluss der Ringe erfolgt durch Kabel, die im Inneren der Elektrode geführt werden. Der verbleibende Hohlraum innerhalb der Elektrode wird durch Epoxidharz verfüllt. Die Multiringelektroden werden so in den Beton einbetoniert, dass sich der oberste Edelstahlring im Abstand eines Isolierings von der Betonoberfläche befindet. Zwischen jeweils benachbarten Edelstahlringen wird nun der elektrolytische Widerstand des umgebenden Betons gemessen. Die Bestimmung des elektrolytischen Widerstandes erfolgt dabei über eine Impedanzmessung mit geeigneter Frequenz, um Polarisationserscheinungen an den Metalloberflächen im Beton oder Effekte aus Kabelinduktivitäten zu vermeiden, z. B. */War03/*.

Der elektrolytische Widerstand zementgebundener Baustoffe hängt maßgeblich von der Art der Porengrößenverteilung, der Gesamtporosität sowie der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung ab. Neben diesen Einflüssen wird der Elektrolytwiderstand durch die Temperatur beeinflusst. Der Einfluss der Temperatur auf den Elektrolytwiderstand kann in Anlehnung an die Arrhenius-Gleichung entsprechend Gleichung 5–1 berechnet werden */War03/*. Hierzu wird die Temperatur in verschiedenen Tiefen des Probekörpers während des Versuchs erfasst (Bild 5–8). In */Hop85/*, */Rau92/*, */Elk95/*, */Jäg01/* werden Werte für die Konstante b im Beton in Abhängigkeit vom w/z -Wert und der Umgebungsfeuchte angegeben. Nach diesen Angaben liegt b zwischen 2300 und 3500 K.

$$R_{el} = R_{el,0} \cdot e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Gleichung 5-1

- R_{el} Elektrolytwiderstand bei Temperatur T in Ω
 $R_{el,0}$ Elektrolytwiderstand bei Temperatur T_0 in Ω
 T, T_0 Absolute Temperaturen in K
 b Konstante in K

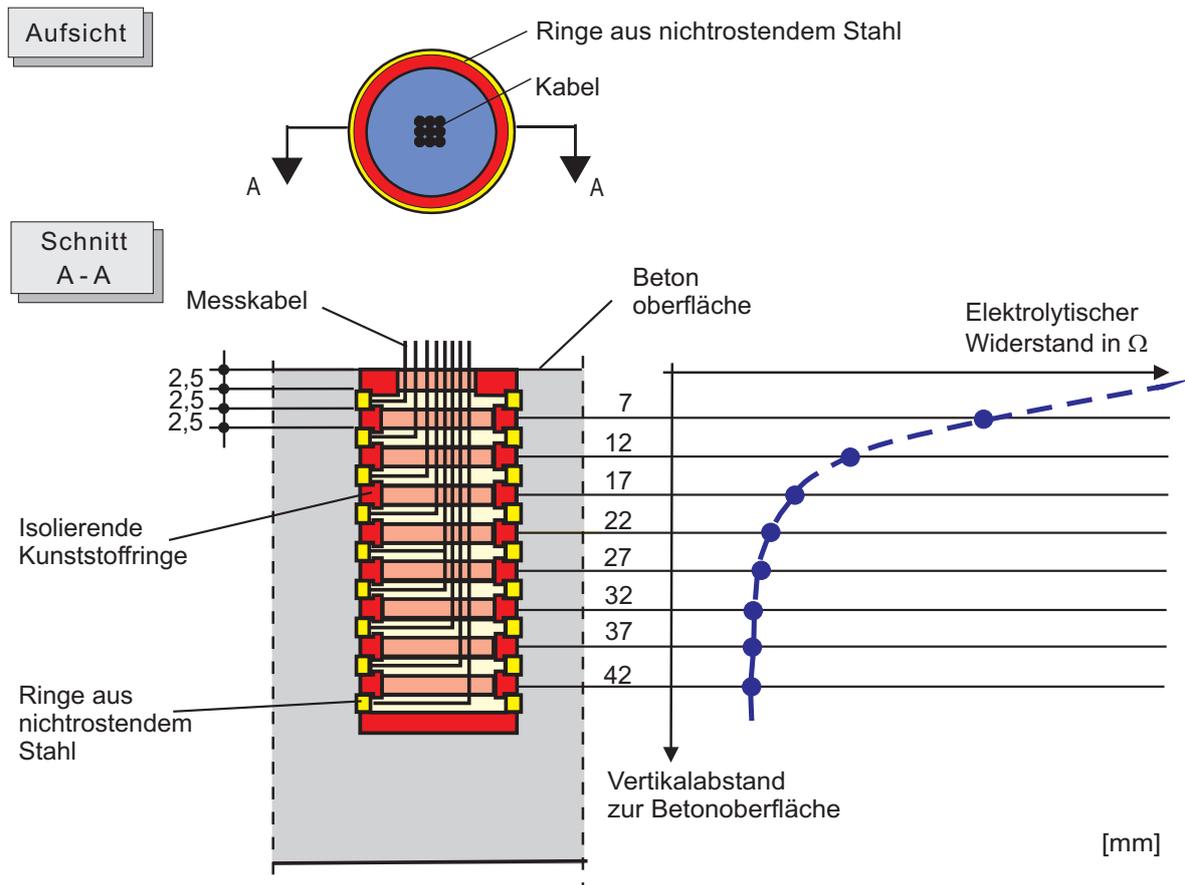


Bild 5-7: Schematischer Aufbau der Multiring-Elektrode /Rau02/

Die Widerstände eines wassergesättigten Betons liegen bei Messungen mit Multiring-Elektroden bei einigen 100 Ω bis etwa 1000 Ω . Bei fortlaufender Austrocknung des Betons von der Randzone ausgehend bis in den Kern steigen die Widerstände um einige Dekaden an. Trockene Betonbauteile in Innenräumen erreichen nach Jahren Widerstände im M Ω Bereich.

Die Versuchsmatrix ist in Bild 5-8 zusammengefasst. Weitere Angaben zu den Betonen und Hydrophobierungen befinden sich in Tab. 5-1 und Tab. 5-2. Jede Hydrophobierung wurde in zwei Dosierungen (100 bzw. 200 g/m²) appliziert. Die Geometrie der Probekörper und die Anordnung der MRE sowie Temperatursensoren in den Proben ist in Bild 5-8 dargestellt. Pro Variante wurden zwei Probekörper untersucht.

Nach einer einjährigen Bewitterung erfolgte eine Beanspruchung der Proben mit Druckwasser. Dazu wurden Kunststoffrohre mit einem Polyurethankleber auf die hydrophobierten Betonoberflächen geklebt. In 24 Stunden-Intervallen wurde die Wasserhöhe in den Rohren um jeweils 15 cm erhöht, bis nach sieben Tagen ein Wasserstand von 1,05 m, also ein Wasserdruck von etwa 0,1 bar erreicht war.

Dieser Wasserdruck wurde über 72 Stunden konstant gehalten. Die elektrolytischen Widerstände der Probekörper wurden kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet.

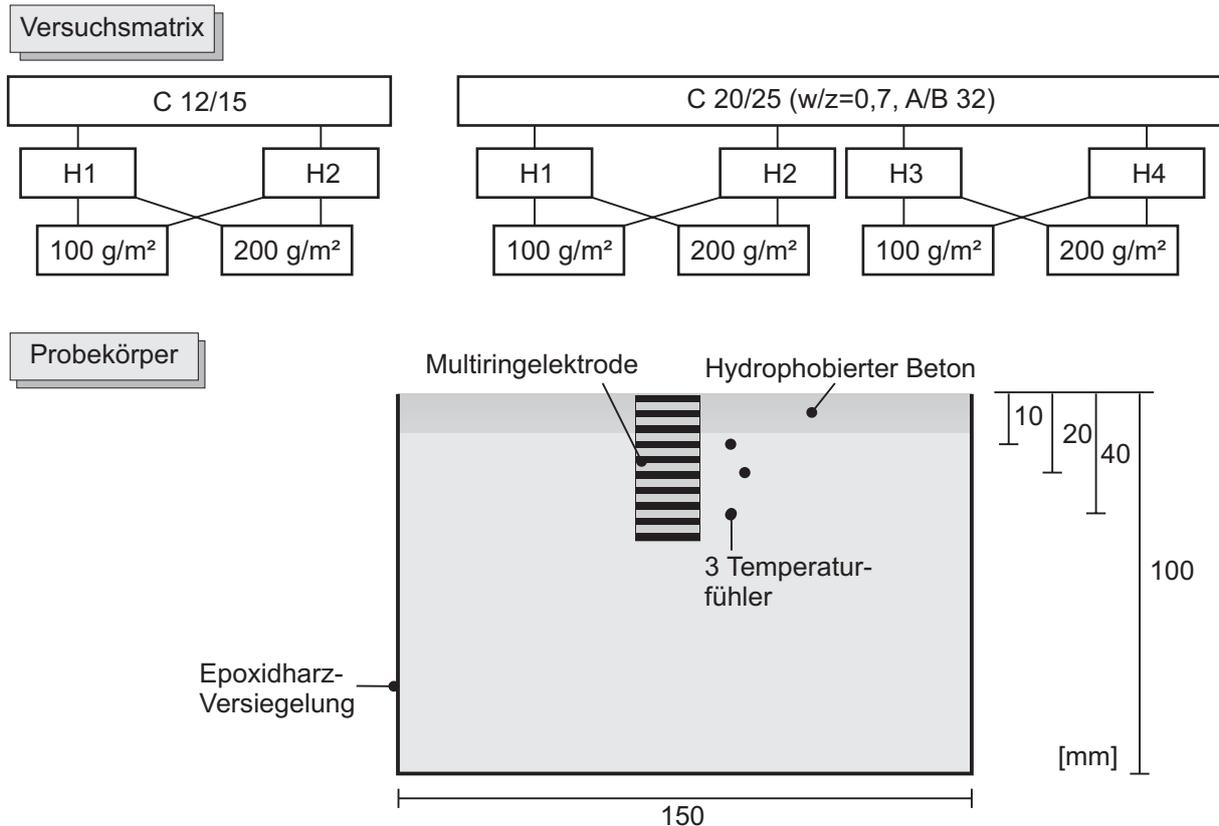


Bild 5–8: Versuchsmatrix für die Bewitterung in der VENUS und in Aachen

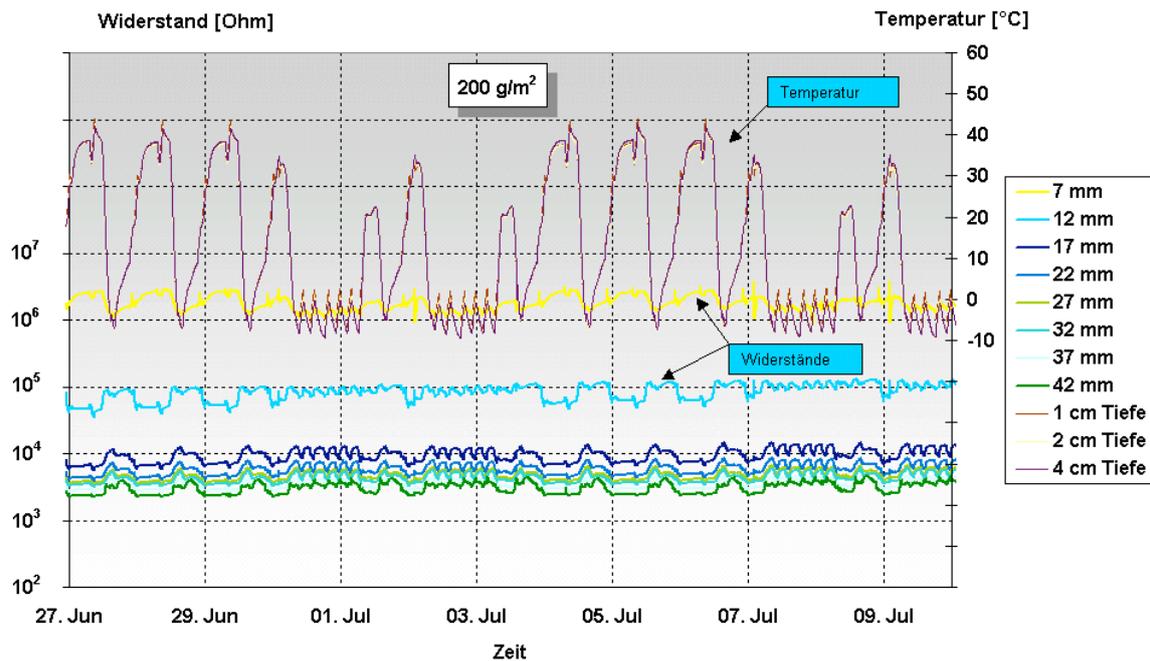
Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse des Projektes kurz erläutert:

Während die nicht hydrophobierten Probekörper erwartungsgemäß in allen Messtiefen Widerstände im Bereich wassergesättigter Betone aufwiesen, zeigte sich bei den hydrophobierten Proben ein differenzierteres Bild. Die hydrophobierten Betone zeigen, bis auf Hydrophobierung H3, an der obersten Messstelle in einer Tiefe von 7 mm vergleichsweise hohe Widerstände mit geringen Schwankungen. Dieser Messbereich wird durch den Bereich der wirksamen Hydrophobierung beeinflusst.

Die folgenden zwei Bilder (Bild 5–9 und Bild 5–10) zeigen die Hydrophobierung H2 in unterschiedlichen Auftragsmengen auf dem Beton C 12/15 nach einem Jahr in der VENUS. In den Diagrammen sind jeweils die Temperaturen in einem, zwei und vier Zentimeter Tiefe dargestellt. Zudem sind die elektrolytischen Widerstände in den Tiefen 7 bis 42 mm abgebildet. Während der mit 200 g/m² behandelte Probekörper eine leicht austrocknende Tendenz zeigt, weist der mit 100 g/m² hydrophobierte Probekörper Ende Juni stetig sinkende Widerstände auf, die zwei Wochen später die Größenordnung eines wassergesättigten Betons erreicht haben.

Bild 5–11 und Bild 5–12 zeigen die Hydrophobierung H3 in unterschiedlichen Auftragsmengen auf einem Beton C 20/25 nach einem Jahr Freibewitterung. Auch bei diesen Probekörpern ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Auftragsmengen festzustellen. Im Probekörper mit dem höheren Anteil an Hydrophobierungsmittel sind die Widerstände über den Sommer nahezu konstant. Eine Dosierung von 200 g/m² reicht also aus, um die Oberfläche ausreichend gegen den Eintritt von flüssigem Wasser zu schützen. Der Probekörper mit 100 g/m² zeigt jedoch nach etwa 11 Monaten Freibewitterung ein plötzliches Versagen der Hydrophobierung H3. Innerhalb weniger Stunden dringt Wasser einige cm

tief in den Beton ein.



5

Bild 5–9: Widerstandsverlauf der mit Hydrophobierung H2 behandelten C 12/15 Probekörper während der VENUS-Bewitterung. Applikationsmenge 200 g/m² /Rau02/

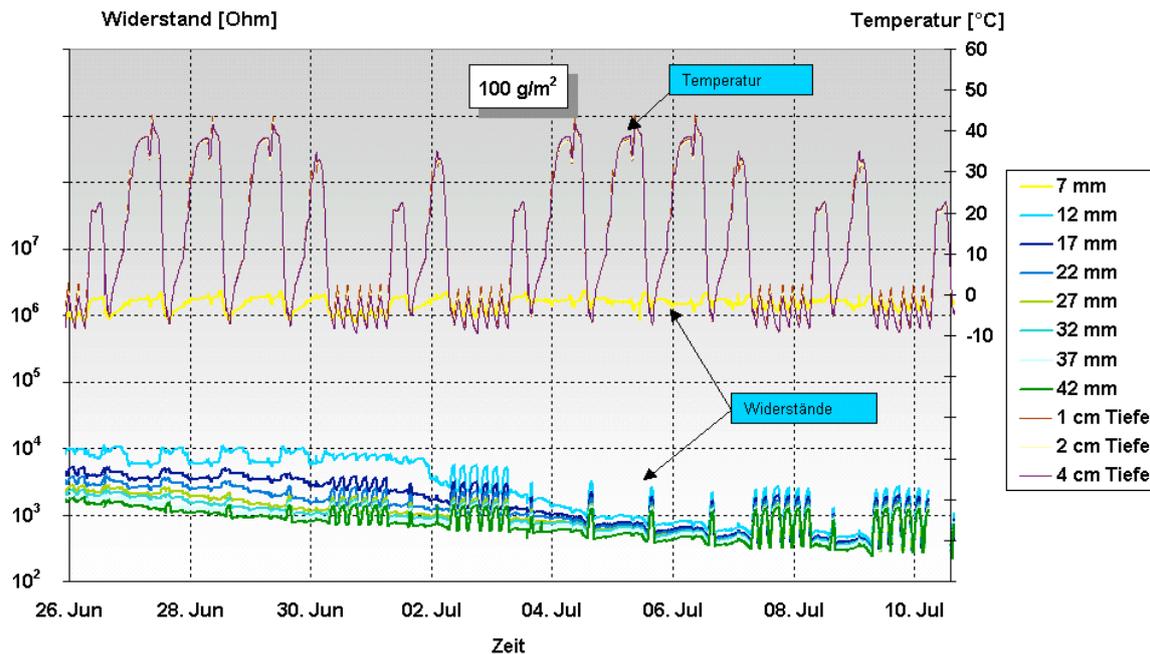


Bild 5–10: Widerstandsverlauf der mit Hydrophobierung H2 behandelten C 12/15 Probekörper während der VENUS-Bewitterung. Applikationsmenge 100 g/m² /Rau02/

Die freibewitterten Probekörper zeigten während der gesamten Bewitterungsdauer relativ gleichmäßige Widerstände, da die Probekörper aufgrund der hohen Regenintensität in Aachen vor allem im Herbst und Winter nicht austrocknen konnten. Die kurzen Trockenphasen in der VENUS reichten hingegen aus, um eine leichte Austrocknung der hydrophobierten Probekörper zu bewirken. Dies spiegelt sich in dem Anstieg der Widerstände bei Erhöhung der Temperatur und insbesondere bei

eingeschalteter Strahlung wider.

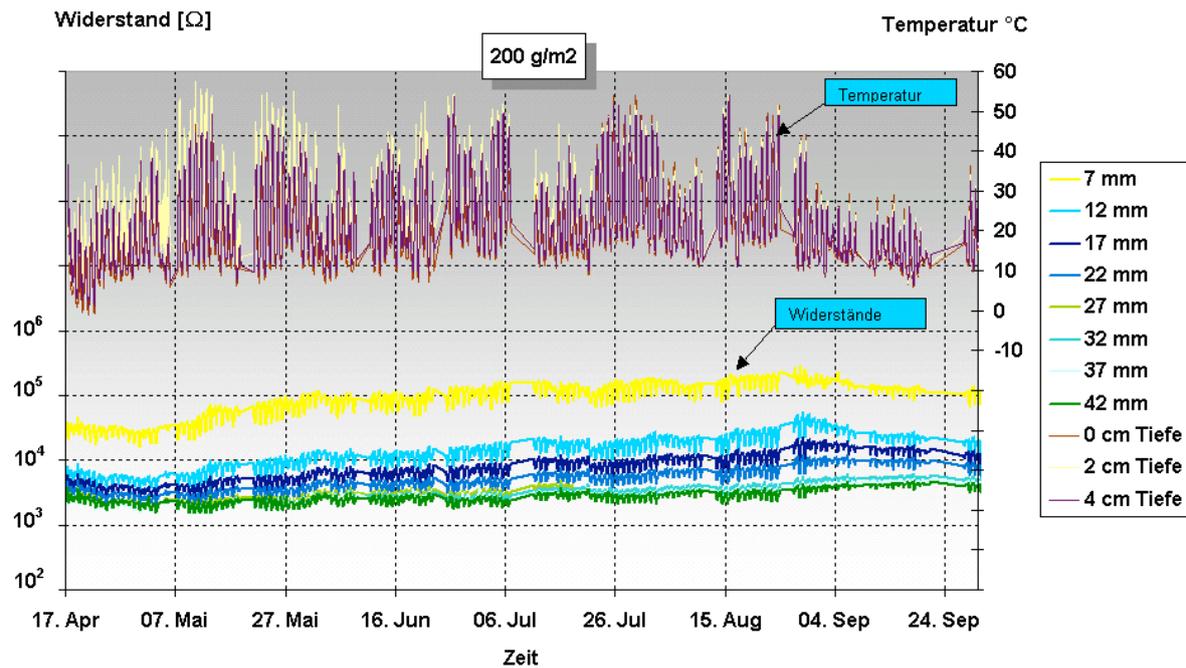


Bild 5–11: Widerstandsverlauf der mit Hydrophobierung H3 behandelten C 20/25 Probekörper während der Freibewitterung. Applikationsmenge 200 g/m² /Rau02/

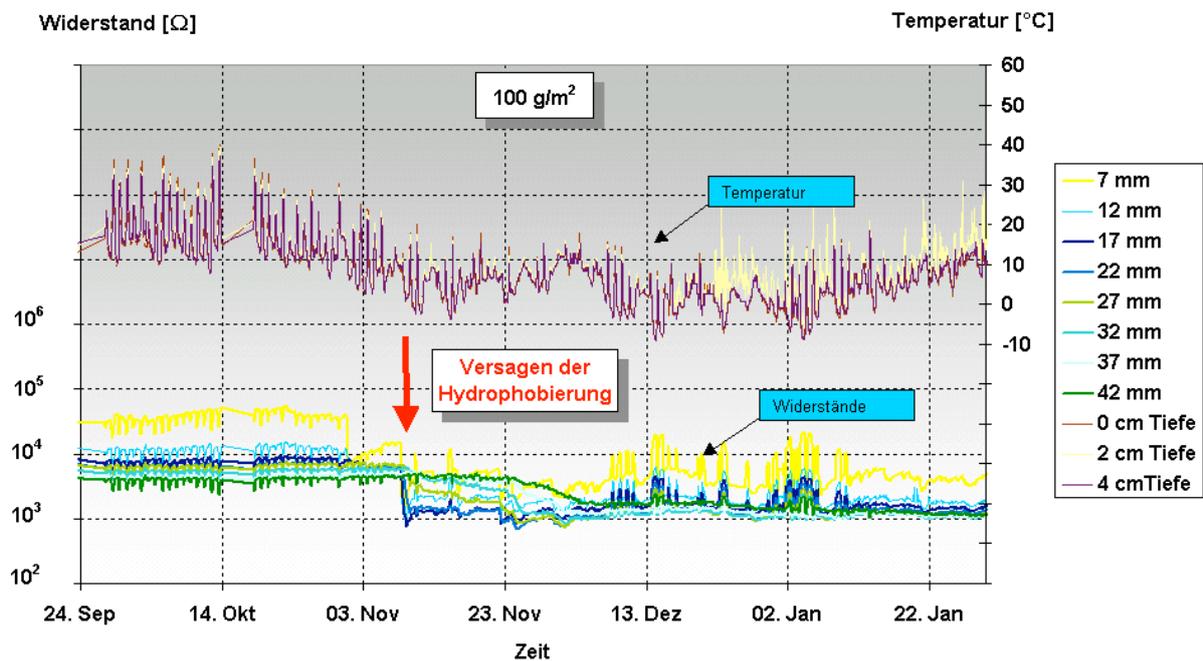


Bild 5–12: Widerstandsverlauf der mit Hydrophobierung H3 behandelten C 20/25 Probekörper während der Freibewitterung. Applikationsmenge 100 g/m² /Rau02/

Tab. 5–3 zeigt eine qualitative Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse. Im Allgemeinen bedingte die Dosierung von 200 g/m² eine längere Wirksamkeit als Auftragsmengen von 100 g/m². Teilweise zeigten die Proben mit einer Dosierung von nur 100 g/m² bereits nach relativ kurzer Bewitterungsdauer eine deutliche Abnahme des Elektrolytwiderstandes. Die unterschiedlichen Wirkstoffgehalte zeigen hingegen kein eindeutiges Bild. So zeigt Hydrophobierung H4 mit einem vergleichs-

weise geringen Wirkstoffgehalt von 40 % vergleichbare Ergebnisse mit Hydrophobierung H1, die den doppelten Wirkstoffgehalt aufweist. Allerdings versagt Hydrophobierung H3 mit nur 20 % Wirkstoffgehalt und einer Auftragsmenge von 100 g/m² als einziges Produkt auf Beton C 20/25 infolge Bewitterung. Diese Materialkombination wies mit 1 mm auch die geringsten Eindringtiefen auf (Bild 5–2).

Die Druckwasserbeaufschlagung ermöglichte eine weitere Differenzierung zwischen den Versuchsparametern. Sie untermauert, dass die in der VENUS beanspruchten Proben im größeren Umfang an Leistungsfähigkeit eingebüßt haben als die freibewitterten Proben. In Tab. 5–3 ist jeweils angegeben bis zu welcher Wassersäule die Hydrophobierung wirksam blieb. Wassergesättigt bedeutet ein Versagen bei einer Wassersäule von 15 cm.

Tab. 5–3: Qualitative Ergebnisübersicht nach den einzelnen Beanspruchungen /Rau02/

Beton	Art der Hydrophobierung	Auftragsmenge	VENUS	Freibewitterung	Druckwasserbeaufschlagung	
					VENUS	Freibewitterung
C 12/15	Referenz	-	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt
	H1	100 g/m ²	trocken	trocken	wassergesättigt	105 cm
		200 g/m ²	wassergesättigt	trocken	wassergesättigt	60 cm
	H2	100 g/m ²	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt
		200 g/m ²	trocken	trocken	105 cm	105 cm
	C 20/25	Referenz	-	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt
H1		100 g/m ²	trocken	trocken	75 cm	105 cm
		200 g/m ²	trocken	trocken	105 cm	105 cm
H2		100 g/m ²	¹⁾	trocken	wassergesättigt	wassergesättigt
		200 g/m ²	trocken	trocken	105 cm	105 cm
H3		100 g/m ²	wassergesättigt	wassergesättigt	wassergesättigt	30 cm
		200 g/m ²	trocken	trocken	90 cm	105 cm
H4		100 g/m ²	trocken	trocken	45 cm	45 cm
		200 g/m ²	trocken	trocken	60 cm	105 cm

¹⁾ keine Auswertung

In einem weiteren Forschungsvorhaben /Rau11a/ wurde unter anderem der Widerstand eines hydrophobierten Betons gegenüber dem Eindringen von Natriumchloridlösung untersucht. Hierzu wurde der Beton C 30/37 nach Tab. 5–2 in einem Alter größer 90 Tagen mit den Hydrophobierungen H1 (200 g/m²) und H2 (175 g/m²) nach Tab. 5–1 hydrophobiert. Während ein Teil der Proben über 90 Tage bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte lagerte, wurde der andere Teil in der VENUS mit dem in Bild 3–13 dargestellten Zyklus bewittert. Insgesamt erfolgten 42 Bewitterungszyklen. Im Anschluss erfolgte die Beaufschlagung der Betonoberflächen mit gesättigter Natriumchloridlösung. Bild 5–13, rechts zeigt das Vorgehen. Auf entnommenen, an den Mantelflächen mit Epoxidharz versiegelten Bohrkernen mit einem Durchmesser von 50 mm wurden Kunststoffringe aufgebracht. In diese abgedichteten Kunststoffringe wurde die gesättigte NaCl-Lösung eingefüllt. Die Beaufschlagung mit NaCl-Lösung erfolgte über eine Dauer von 112 Tagen im Laborklima (23 °C / 50 % r. F.). Nach Abschluss der Beaufschlagung wurde der Chloridgehalt im Beton tiefenabhängig bestimmt. Hierfür wurde aus 1,5 mm dicken Betonschichten Schleifmehl in vier Tiefenlagen, also bis in eine Gesamttiefe von 6 mm, gewonnen. Anschließend erfolgte die nasschemische Bestimmung des in der Probe vorhandenen Chloridgehalts nach Säureaufschluss (Salpetersäure) mittels der potentiometrischen Titration in Anlehnung an DIN EN 14629. Um einen Chloridverlust durch Abdampfen von Salzsäure zu

verhindern, wurde abweichend zur Norm der Aufschluss bei Raumtemperatur durchgeführt. Mit dem aufwendigen Verfahren der Schleifmehlgewinnung können jeweils nur geringe Probenmengen für die Analyse gewonnen werden, somit liegt den Analyseergebnissen eine Einfachbestimmung zu Grunde.

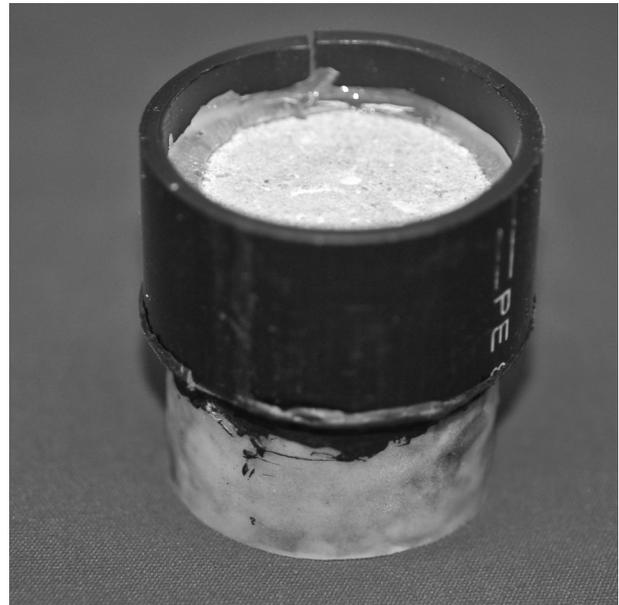
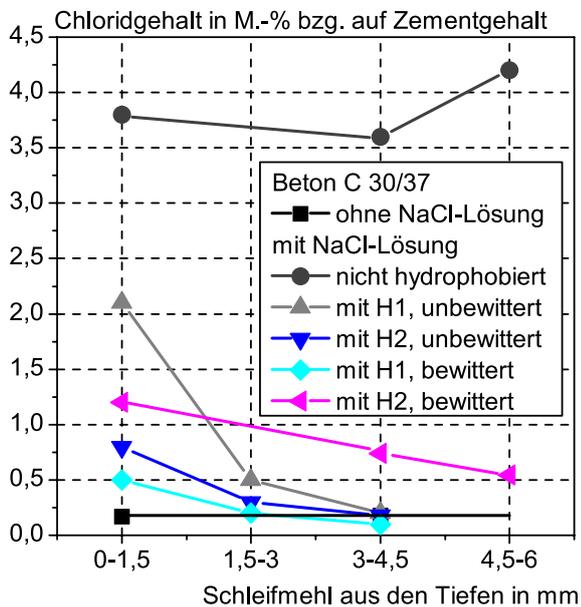


Bild 5–13: Links: Chloridgehalt in hydrophobierten Betonen, Einfluss einer komplexen Bewitterung. Rechts: Versuchsdurchführung bei der Chloridbeaufschlagung

Bild 5–13, links, verdeutlicht das Ergebnis der Untersuchungen: Während im nicht hydrophobierten Beton der Chloridgehalt bezogen auf den Zementgehalt auf rund 4 M.-% bis in eine Tiefe von 6 mm angestiegen ist, weisen die hydrophobierten Betone deutlich geringere Chloridgehalte auf. Bei den hydrophobierten Betonen zeigt sich ein Abfall des Chloridgehaltes mit zunehmender Probentiefe. An der Betonoberfläche, im Bereich 0 bis 1,5 mm, schwankt der Chloridgehalt der hydrophobierten Proben zwischen 0,5 und 2 M.-% bzgl. auf den Zement, in den tieferen Lagen sinkt er unterhalb von 0,5 M.-% bis hin zum Chloridgehalt des Betons von rund 0,18 M.-% bzgl. auf Zement. Entsprechend den Darstellungen in Bild 5–3 und Bild 5–4, Abschnitt 5.2.2, ist die Hydrophobie an der Betonoberfläche bis in eine Tiefe von rund 1 mm häufig geringer als in den darauf folgenden Schichten. Dies kann die höheren Chloridgehalte im Bereich 0 bis 1,5 mm erklären. Die mehrparametrische Bewitterung der hydrophobierten Betone scheint bei der Hydrophobierung H2 zu einer Schwächung der hydrophoben Wirkung geführt zu haben, da diese Probe auch in tieferen Bereichen bis 6 mm erhöhte Chloridgehalte von 0,5 bis 0,75 M.-% aufweist. Bei der Hydrophobierungscreme H1 ist dieser Effekt nicht vorhanden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN EIN- UND MEHRPARAMETRIGEN BEANSPRUCHUNGEN HYDROPHOBIERTER BETONE

Die Wirksamkeit hydrophobierter, im Vorfeld karbonatisierter Betone wird bei Auftragsmengen $\geq 200 \text{ g/m}^2$ und Wirkstoffgehalten $\geq 40 \%$ im Allgemeinen nicht durch eine einjährige Freibewitterung beeinflusst. Eine Beschleunigung der Beanspruchung in der VENUS bedingt keine mit Multiringelektroden erfassbare Veränderung in der Wirksamkeit. Anhand der Bestimmung der Wasseraufnahme wurde jedoch gezeigt, dass infolge einer Karbonatisierung hydrophobierter Betone die Wirksamkeit einiger Hydrophobierungen nachlässt. Ein ähnliches Verhalten wird infolge Hydratation vermutet und zurzeit untersucht. Eine Reduktion der Auftragsmenge bedingt hingegen einen frühzeitigeren Verlust an Wirksamkeit. Dies lässt sich auch für Wirkstoffgehalten unterhalb von 40 % feststellen.

Generell ist eine sensitivere Untersuchungsmethode erforderlich um Veränderungen innerhalb der hydrophoben Betonschicht frühzeitig detektieren zu können. Wie im Bild 5–3 erläutert, erfüllt die entwickelte indirekte Methode über die fein aufgelöste, tiefenabhängige Bestimmung der Protonen des Wasserstoffs mit der NMR-MOUSE diese Forderung.

5.3 OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME AUF DISPERSIONSBASIS

5.3.1 UNTERSUCHTE DISPERSIONEN

Die in diesem Abschnitt dargestellten Untersuchungsergebnisse wurden mit den in Tab. 5–4 aufgeführten Dispersionen ermittelt. Bei den auf Beton bzw. Mörteln applizierten Dispersionen handelt es sich um OS 5a Systeme, entsprechend Bild 2–19. Die hwO besteht aus zwei Dispersionsschichten. Auf eine Grundierung und Deckversiegelung wurde verzichtet. Die Kennwerte der Dispersionen sind in Tab. 5–5 zusammengestellt.

Tab. 5–4: Aufbau der untersuchten Oberflächenschutzsysteme OS 5a

Bezeichnung	hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht (hwO)	
	1. Schicht	2. Schicht
OS 5-2	Acrylat-Dispersion E	Acrylat-Dispersion S
OS 5-3	Acrylat-Dispersion W	Acrylat-Dispersion W

Tab. 5–5: Kennwerte der untersuchten Dispersionen (Glasübergangstemperatur T_G und Wasseraufnahme wurden an Freien Filmen bestimmt)

Bez.	Produkt	Polymerbasis	Dichte	Festkörpergehalt	T_G	Wasseraufnahme	Partikelgröße
			kg/m ³	Vol.-%	°C	M.-%	nm
OS 5-2	Dispersion E und S	Acrylat	1400	55	E: -32,5 S: -33,5	7,85	~ 100-300
OS 5-3	Dispersion W	Acrylat	1390	53,4	-32	7,78	

Als Untergründe für die Oberflächenschutzsysteme wurden Probekörper aus Mörtel und Beton hergestellt. Die Zusammensetzung des Mörtels lehnt sich an DIN EN 196-1 an (CEM I 52,5 R; w/z: 0,5 und Normsand). Hieraus wurden Rissüberbrückungsprismen entsprechend Abschnitt 3.4.4 und Platten von 400 x 400 x 60 cm³ hergestellt. Die Oberflächenschutzsysteme wurden zudem auf Betonplatten von 200 x 200 x 60 cm³ appliziert. Der Beton bestand aus rd. 460 kg/m³ CEM I 42,5 und 1700 kg/m³ Kiessand AB 8 bei einem w/z von 0,40. Auf die Betonplatten wurde vor der Applikation der OS 5a-Systeme ein Feinspachtel aufgebracht.

Aus den in Tab. 5–4 aufgeführten Dispersionen wurden zudem bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte Freie Filme auf mit Teflon beschichteten Glasplatten hergestellt. Nach einer Aushärtezeit von einem

Tag bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte wurden die Filme von den Teflonplatten entnommen und die Schichtdicken bestimmt.

Die Dispersionen wurden mittels Lammfellrolle appliziert. Die Auftragsmengen betragen je Schicht zwischen 300 und 430 g/m².

5.3.2 ERGEBNISSE EINER 12JÄHRIGEN AUSLAGERUNG AN VERSCHIEDENEN STANDORTEN

ERLÄUTERUNG DER DURCHGEFÜHRTEN UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen einer Langzeitstudie, beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr, werden seit 1995 Oberflächenschutzsysteme als freie Filme und auf Beton-/Mörtelplatten appliziert auf Sylt (Seeklima) und in Duisburg (Industrieklima) bewittert. Zusätzlich wurden die Materialien im Labor künstlich bewittert, um die im damaligen Regelwerk ZTV-SIB 90 /TP90/ (heute ZTV-ING) vorgeschriebene künstliche Bewitterung mit der Freibewitterung zu vergleichen. Auszüge der Untersuchungen und Ergebnisse dieser Studie wurden unter anderem auch in /Ant09/, /Orl10b/ und /Rau08/ veröffentlicht.

Neben den hier dargestellten Ergebnissen der OS 5a-Systeme wurden zudem drei OS 5b und drei OS 9-Systeme im Rahmen des Forschungsvorhabens /Rau09a/ untersucht. Auf die OS 5b Systeme wird im Abschnitt 5.4 eingegangen. Die an den Systemen durchgeführten Bewitterungen sind in Tab. 5–6 zusammengefasst.

Tab. 5–6: An den OS-Systemen durchgeführte Bewitterungen

Bezeichnung	Beschreibung
KB 1	Künstliche Bewitterung: Kontinuierliche Strahlung, Strahlungsfunktion B (Bestrahlung H_e : 250 MJ/m ²) 5 h Trocknungsphase, Schwarzstandard-Temperatur 55 °C, 1 h Benässung Schwarzstandard-Temperatur 20 °C, Gesamtdauer 1240 h
KB 2	Künstliche Bewitterung: Kontinuierliche Strahlung, Strahlungsfunktion B (Bestrahlung H_e : 500 MJ/m ²) 5 h Trocknungsphase, Schwarzstandard-Temperatur 55 °C, 1 h Benässung Schwarzstandard-Temperatur 20 °C, Gesamtdauer 2480 h
FTS	Temperaturwechselbeanspruchung über 20 Zyklen: Warmlagerung: T = 60 °C über 5 h 45 min Beregnung mit Leitungswasser: T = 12 °C über 15 min Frost-Tausalz-Beanspruchung über 100 Zyklen: 2 h Lagerung in gesättigter Kochsalzlösung bei T = -15 °C; 2 h Wasserlagerung bei T = 20 °C
S	Freibewitterung auf Sylt. Probenexposition mit einer Neigung von 45° Richtung Süden. Untersuchungen nach 3a, 5a und 12a
D	Freibewitterung auf Duisburg. Probenexposition mit einer Neigung von 45° Richtung Süden. Untersuchungen nach 3a, 5a und 12a

Nach den jeweiligen Entnahmen der Proben wurden die Erscheinungsbilder betrachtet, die Haftzugfestigkeiten, Gitterschnitte, Rissüberbrückungsfähigkeiten sowie Schichtdicken bestimmt und CPMG-Messungen mit der NMR-MOUSE durchgeführt. Im nachfolgenden wird kurz die Vorgehensweise bei den jeweiligen Untersuchungen erläutert.

Zur Beurteilung des Erscheinungsbilds wurden alle Probekörper nach der Bewitterung bei 23 °C und

50 % relativer Luftfeuchte ohne UV-Licht gelagert und zu den jeweiligen Zeitpunkten vergleichend nebeneinander gelegt. Als Referenz standen unbewitterte Proben, die immer bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte ohne UV-Einstrahlung gelagert wurden, zur Verfügung. Die visuelle Beurteilung erfolgte anhand der in Abschnitt 3.4.5 genannten Aspekte.

An jeweils einer beschichteten Betonplatte pro System wurde an 5 Messstellen die Haftzugfestigkeit im Ausgangszustand, nach der künstlichen Bewitterung sowie nach 3, 5 und 12 Jahren Freibewitterung bestimmt. Die Prüfungen erfolgten gemäß TP OS (1996), Abschnitt 6.3 /TP96/. In Abschnitt 3.4.4 und mit Bild 3–17 wird das Vorgehen erläutert.

Aus jeder Betonplatte wurde ein Bohrkern aus der Nähe der Haftzugfestigkeitsstempel herausgebohrt und mittig durchgesägt. Die Bestimmung der Schichtdicken erfolgte an fünf Messstellen unter dem Lichtmikroskop bei 16facher Vergrößerung. Die Vorgehensweise ist in Abschnitt 3.4.5 und mit Bild 3–21 erläutert.

Der Gitterschnitt wurde entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 3.4.4 und Bild 3–19 durchgeführt.

Die Prüfung der Rissüberbrückung erfolgte in Anlehnung an TP OS (1996), Abschnitt 6.8 /TP96/. Abweichend zur TP OS wurden drei Prismen pro System im ungealterten Zustand geprüft. Der Versuch ist in Bild 3–18, Abschnitt 3.4.4, dargestellt. Die Prüfung wurde nach Klasse B 2 der Tab. 3–13 durchgeführt. Das heißt die maximale Rissbreite betrug 0,15 mm und die Bewegung des Risses erfolgte mit 0,05 mm 1000 mal bei einer Frequenz von 0,03 Hz. Zur Erfassung von unterseitigen Rissen wurde nach den dynamischen Rissüberbrückungsversuchen ein Teil der Prismen in Scheiben gesägt. Die Scheiben wurden unter dem Lichtmikroskop bei 16facher Vergrößerung auf unterseitige Anrisse oder Ablösungen vom Untergrund untersucht. Der andere Teil wurde gemäß TP OS (1996), Abschnitt 6.8, bei Raumtemperatur aufgeweitet, um die maximal überbrückbare Rissbreite zu bestimmen.

Die NMR-Messungen wurden mit der PM 5 durchgeführt. Dabei erfolgte die Datenanalyse durch Anpassung der mit der CPMG-Sequenz gemessenen Echoeinhüllenden $s(t)$ mit Gleichung 4–6. Als Vergleich zu den Messungen an den 12-jährigen Proben wurden unbewitterte Proben sowie Proben die nach 3 und 5 Jahren der Freibewitterung entnommen wurden untersucht. Diese Proben lagen allerdings vor den NMR-Messungen 12, 9 bzw. 7 Jahre im Labor bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte ohne UV-Licht.

ERGEBNISSE DER VISUELLEN BEURTEILUNG

Die visuelle Veränderung der freibewitterten, auf Beton applizierten Dispersionen variiert mit den Auslagerungsstandorten. Bild 5–14 gibt eine Übersicht über das Aussehen der Proben nach einer 12jährigen Freibewitterung auf Sylt und in Duisburg. Die Proben wurden ungereinigt und gereinigt fotografiert. Die Reinigung erfolgte händisch mittels Wasser und einer Borstenbürste. Die auf Sylt ausgelagerten Proben weisen einen Flechtenbewuchs auf, während bei den in Duisburg ausgelagerten Platten vollflächige Schmutzablagerungen dominieren.

Der Flechtenbewuchs und die Schmutzablagerungen sind durch eine Reinigung weitgehend entfernbar. Allerdings bleiben lokale Schattierungen an den Oberflächen zurück. Eine Schädigung in tiefergehenden Schichten war an den Schnittflächen unter dem Mikroskop nicht erkennbar. Risse, Blasen oder Ablösungen vom Betonuntergrund wurden nicht festgestellt.

Vergleichend zum OS 5-2 wurde das OS 5-3 System auf Sylt in einem geringeren Ausmaß von Flechten befallen. Weiterhin war hier auch die Ablagerung von Schmutzpartikeln in Duisburg geringer.

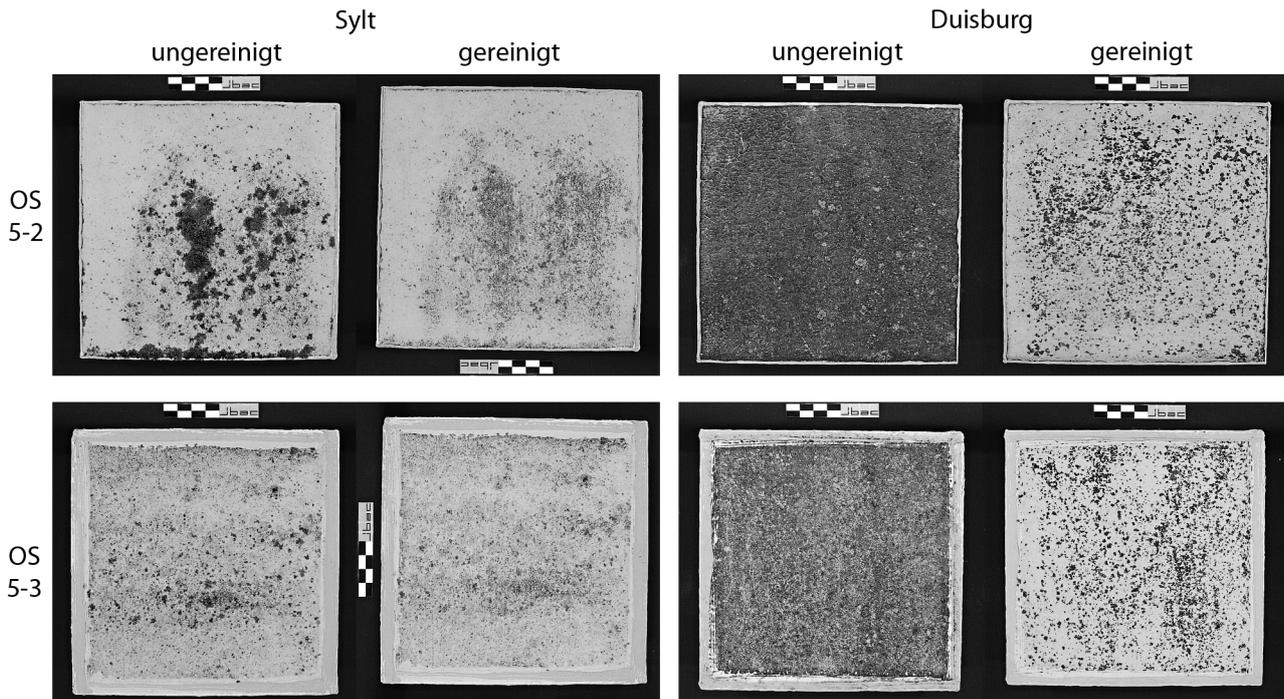


Bild 5-14: Erscheinungsbild der freibewitterten, beschichteten Betonplatten vor und nach der Reinigung mit Wasser und Bürste

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER HAFTZUGFESTIGKEITEN

Ein Zusammenhang zwischen der zunehmenden Bewitterungsdauer und einer Veränderung der Haftzugfestigkeiten wurde weder für OS 5-2 noch für OS 5-3 festgestellt. Exemplarisch sind in Bild 5-15 die Haftzugfestigkeiten mit den zugehörigen Bruchbildern für das OS 5-2 dargestellt. Häufig überwiegt das Versagen im Beton und/oder im Feinspachtel (Referenz, künstliche Bewitterung, Frost-Tausalz-Wechsel, Duisburg und 12 Jahre Sylt). Ein Versagen in den Dispersionsschichten tritt demnach erst oberhalb von $2,5 \text{ N/mm}^2$ auf. Dieser Wert verringert sich auch nicht mit zunehmender Bewitterungsdauer.

ERGEBNISSE DER SCHICHTDICKENMESSUNGEN

Bild 5-16 verdeutlicht, dass eine signifikante Veränderung der Schichtdicken der OS 5a-Systeme infolge der unterschiedlichen Bewitterungen mit der hier gewählten optischen Messmethode nicht detektierbar ist. Unter Berücksichtigung der gemessenen Streuungen bleiben die Schichtdicken konstant. Gegebenenfalls treten im Bereich der Oberfläche der Polymerdispersionen, also innerhalb der ersten 50-100 nm Materialveränderungen bzw. -abwitterung auf, diese können jedoch mit dem Mikroskop nicht erfasst werden.

ERGEBNISSE DES GITTERSCHNITTS

Bei den im Gitterschnitt untersuchten Systemen weisen beide Systeme auch nach 12 jähriger Freibewitterung einen Gitterschnittkennwert $GT = 0$ auf. Das heißt, die Schnittländer sind vollkommen glatt, keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt. Der in der TP/TL OS (1996) geforderte Grenzwert für den Gitterschnitt beträgt $GT \leq 2$ (geringer Anteil an Abplatzungen). Verglichen mit den Ergebnissen der Referenz, der künstlichen Bewitterung und Freibewitterung nach 3 und 5 Jahren bleibt der Gitterschnittkennwert konstant.

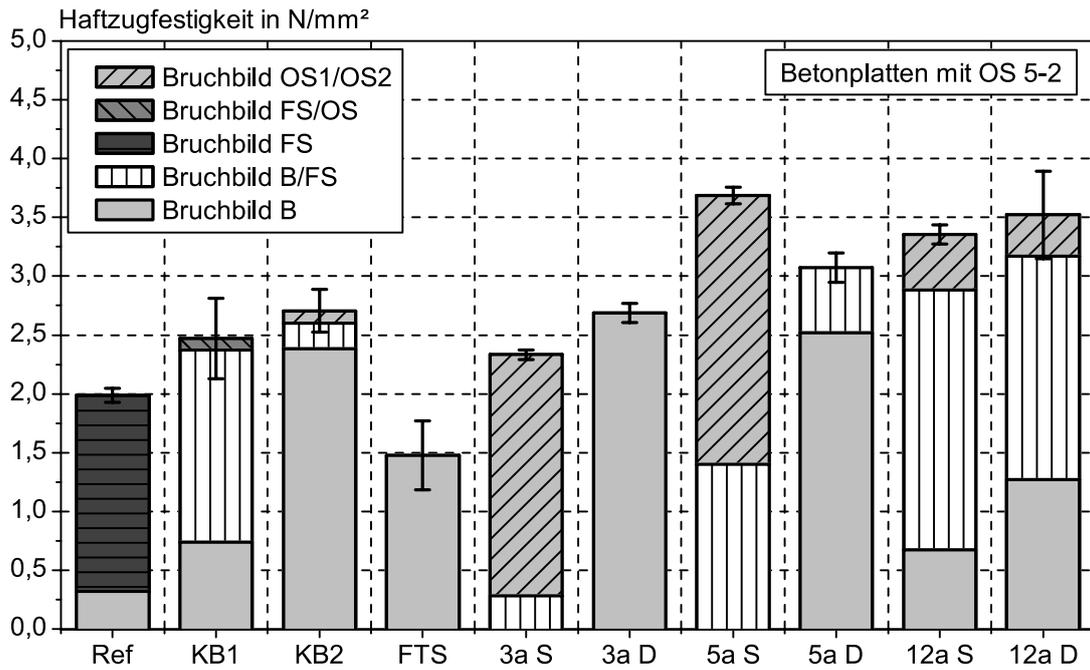


Bild 5-15: Haftzugfestigkeiten und Bruchbilder des Systems OS 5-2 (B: Beton, FS: Feinspachtel, OS: Oberflächenschutzschichten; ausführliche Erläuterung in Abschnitt 3.4.4)

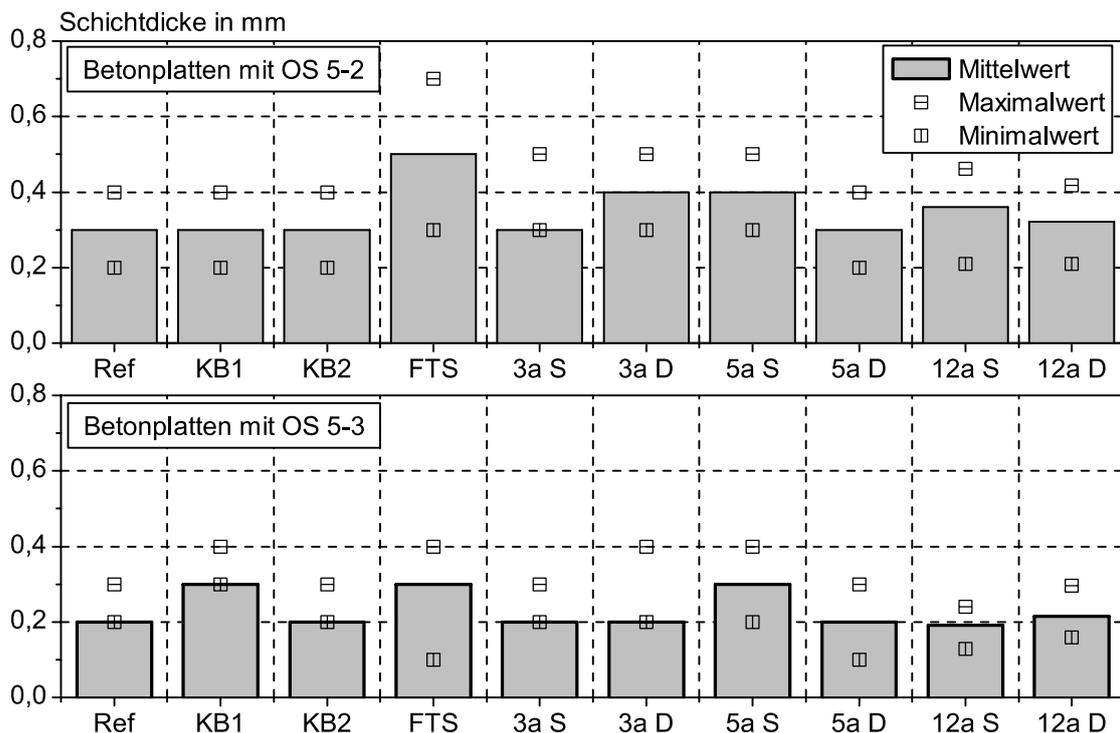


Bild 5-16: Schichtdicken der OS 5-2 und OS 5-3 Systeme auf den Betonplatten

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER RISSÜBERBRÜCKUNGSFÄHIGKEIT

Die angestrebte Rissüberbrückungsklasse B 2 wird von beiden Systemen auch nach 12 jähriger Freibewitterung noch erreicht. Infolge der Frei- und Laborbewitterung ist somit anhand der dynamischen Rissüberbrückungsprüfung für Klasse B 2 keine Veränderung detektierbar. Die im Anschluss

an diese Prüfung durchgeführte Aufweitung des Risses bis zum Versagen ermöglicht hingegen eine Differenzierung der Bewitterungen und Bewitterungsdauern.

Die maximal überbrückbare Rissbreite nimmt infolge der Bewitterung ab. Bild 5–17 verdeutlicht, dass eine Erhöhung der Bestrahlungsdauer bei der Laborbewitterung (KB 2) zu einer weiteren Reduktion der maximal überbrückbaren Rissbreite führt. Infolge der Freibewitterung nimmt die maximal überbrückbare Rissbreite infolge der ersten drei Jahre am stärksten ab. Zwischen drei und fünf Jahre ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Aber nach einer 12 jährigen Freibewitterung auf Sylt oder in Duisburg liegt die maximal mögliche Rissaufweitung auf dem Niveau der Laborbewitterung KB 2. Dies wurde auch für das OS 5-3 System festgestellt. Die Laborbewitterung KB 2 bildet damit die reale Entwicklung der maximalen Rissüberbrückungsfähigkeit relativ gut ab. Eine Differenzierung zwischen den beiden Bewitterungsstandorten ist nicht möglich.

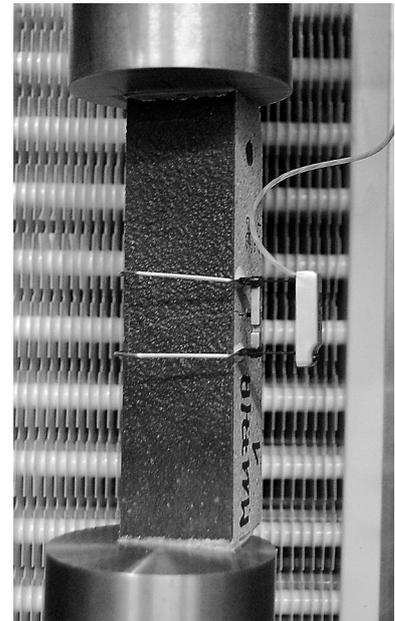
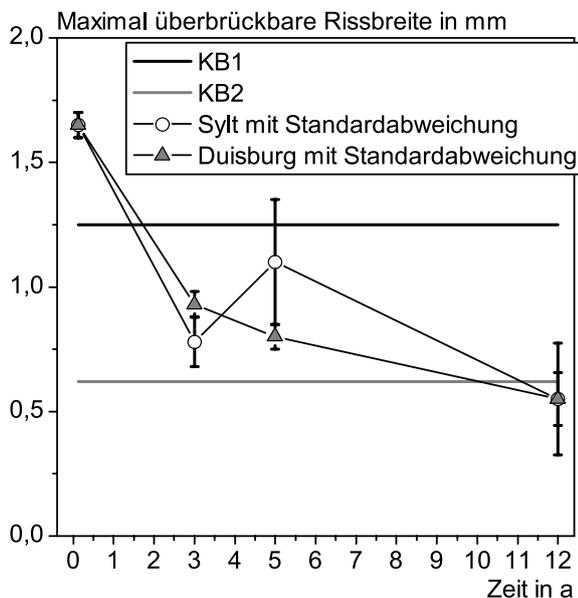


Bild 5–17: Links: Zeitliche Entwicklung der maximal möglichen Rissaufweitung des Systems OS 5-2. Rechts: Versuchsdurchführung, exemplarisch an einem OS 5b System gezeigt.

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER RELAXATIONSZEIT T_2

Bild 5–18 zeigt die mittels Gleichung 4–6, der skaliert, gestreckten Exponentialfunktion, ermittelten Kennwerte Amplitude, b-Faktor und Relaxationszeit T_2 für das in Duisburg bewitterte System OS 5-3. Das System wurde mittels der NMR-MOUSE PM 5 sowohl als Freier Film als auch als Beschichtung auf Beton untersucht. Dabei betrug die Echozeit 0,03 ms und die Repetitionszeit 0,5 s. Es ist zu erkennen, dass die Freibewitterung den b-Faktor und das T_2 beeinflusst. Während innerhalb der ersten 3 Jahre keine signifikante Veränderung der Faktoren auftritt, sinken beide Faktoren nach 5 Jahren ab. Mit zunehmender Bewitterungsdauer nimmt die Relaxationszeit tendenziell ab. Sowohl der Freie Film als auch die applizierte Beschichtung zeigen diese Entwicklung. Aufgrund der höheren Materialflexibilität weist der Freie Film ein größeres T_2 auf als das applizierte Material. Der Abfall der Relaxationszeit deutet auf eine Abnahme der Beweglichkeit der Polymermolekülketten hin, was mit einer erhöhten Materialsteifigkeit einhergeht. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch im Anstieg des E-Moduls der Freien Filme von 3,8 N/mm² (Referenz) auf 7,4 N/mm² nach 5-jähriger Freibewitterung in Duisburg wieder.

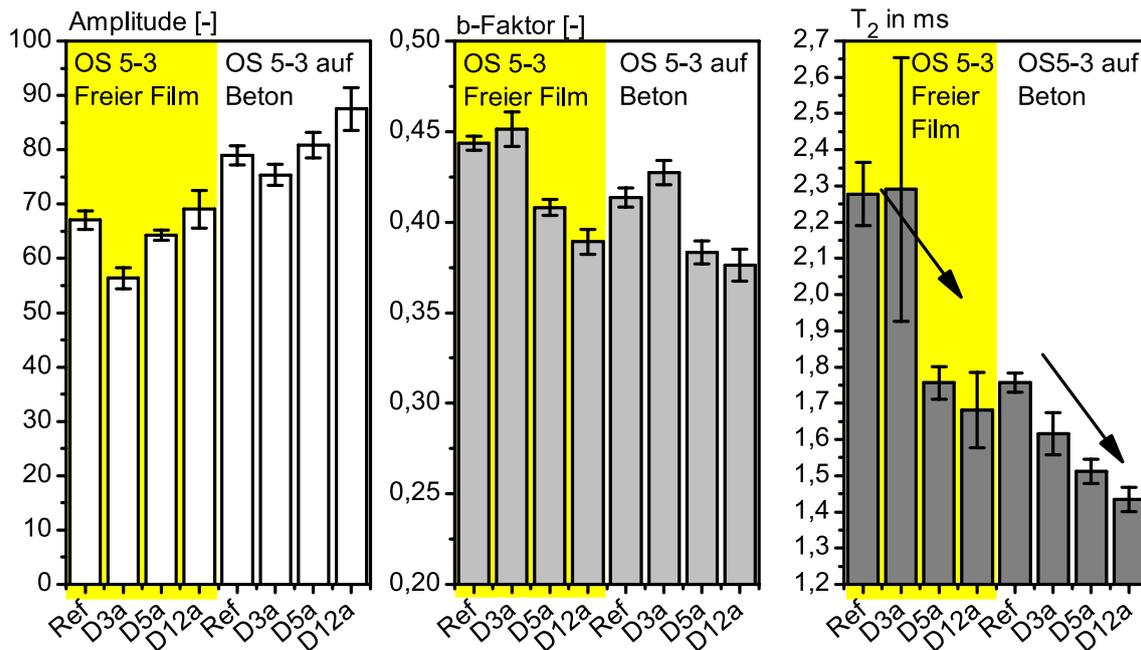


Bild 5-18: Amplitude, b-Faktor und T_2 des Freien Films und des auf Beton applizierten Materials OS 5-3 nach 3, 5 und 12 Jahren in Duisburg

5.3.3 MATERIALVERÄNDERUNGEN NACH UNTERSCHIEDLICHEN LABORBEWITTERUNGEN

ERLÄUTERUNG DER DURCHGEFÜHRTEN UNTERSUCHUNGEN

Die in diesem Abschnitt dargestellten Untersuchungsergebnisse sind im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens mit dem Deutschen Kunststoffinstitut in Darmstadt (DKI) und dem Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen (ITMC) entstanden. Es wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung bewitterter Oberflächenschutzsysteme eingesetzt, um u. a. die Leistungsfähigkeit der NMR-MOUSE auf diesem Gebiet zu ermitteln. Ein Teil der Ergebnisse wurde in /Orl09/, /Orl10b/, /Orl11b/ veröffentlicht.

Bei der Materialauswahl wurde auf die Systeme des zuvor erläuterten Forschungsvorhabens zurückgegriffen, um ggf. auch einen Bezug zu den Freibewitterungsdaten herstellen zu können. Beide OS 5a Systeme (beschrieben in Abschnitt 5.3.1), die bereits 1995 in Duisburg und auf Sylt ausgelagert wurden, sind unter ihrem Produktnamen noch am Markt verfügbar. Allerdings ist unbekannt welche Komponenten der Polymerdispersionen in den vergangenen rund 15 Jahren ausgetauscht wurden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Freie Filme hergestellt und Mörtelplatten beschichtet. Die Materialien und Vorgehensweise sind in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Die Probekörper wurden im UV-Schrank, in der Frosttruhe und in der VENUS bewittert. Anhand der unterschiedlichen Bewitterungen sollten folgende Einflüsse betrachtet werden:

- UV-Bewitterung nach Tab. 3-10, DIN EN 1062-11, mit bis zu 250 Zyklen: Einfluss der UV-Strahlung in Kombination mit Feuchtigkeit und hohen Temperaturen.
- VENUS Bewitterung mit dem in Bild 3-13 dargestellten Zyklus. Die bis zu 180 Tage währende

komplexe, naturnahe und dennoch beschleunigte Bewitterung sollte eine Freibewitterung simulieren.

- Frost-Tau-Wechsel entsprechend Bild 5–19 mit bis zu 80 Zyklen zeigen den Einfluss von Feuchtigkeit und starken Temperaturschwankungen ohne UV-Belastung. Um zu gewährleisten, dass die Polymerdispersionen am Ende der jeweiligen Wasserlagerungen zu etwa 50 % wassergesättigt sind, wurde die Dauer der Wasserlagerung von 2 Stunden nach DIN EN 13687-3 (siehe auch Tab. 3–10) auf 3 Stunden erhöht.

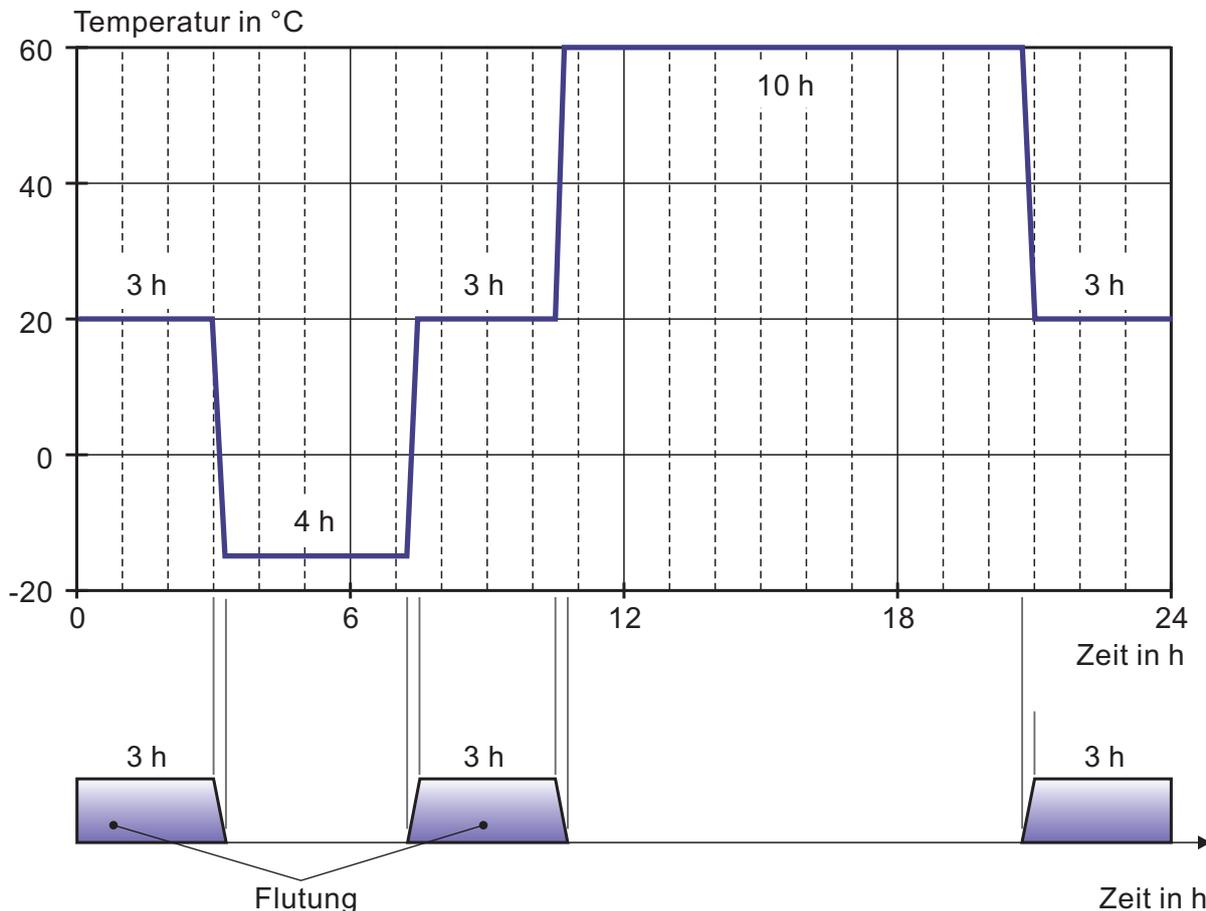


Bild 5–19: Durchgeführte Frost-Tau-Wechsel, mit Abweichend zur DIN EN 13687-3 auf 3 Stunden verlängerte Wasserlagerung

An den unbewitterten und bewitterten Freien Filmen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Zugversuche (Bruchspannung, Bruchdehnung, E-Modul), Erläuterung des Versuchs im Abschnitt 3.4.4
- Wasserdampfdiffusion, Erläuterung des Versuchs im Abschnitt 3.4.3
- T_2 -Relaxation mittels der NMR-MOUSE PM 5

An den beschichteten Mörtelplatten wurden ebenfalls Messungen mit der NMR-MOUSE PM 5 durchgeführt.

DETEKTIERTE VERÄNDERUNGEN AN DEN POLYMERFILMEN

Die NMR-Messungen wurden jeweils in der 1. Schicht der hwO in einer Messtiefe von 100 µm

durchgeführt. Pro Variante wurden drei Freie Filme mit jeweils drei Messungen untersucht. Die dargestellten Werte beinhalten demnach neun Einzelwerte. Die NMR-Messungen wurden mit einer Echozeit von 0,030 ms, einem sensitiven Volumen von 200 μm , einer Echoanzahl von 230, 4900 scans, und einer Repetitionszeit von 0,3 s durchgeführt.

Bild 5–20 zeigt exemplarisch die T_2 -Zerfallskurve des unbewitterten OS 5-2Films und die T_2 -Zerfallskurven der in der VENUS bewitterten Filme. Mit zunehmender Bewitterungsdauer zerfällt die transversale Magnetisierung schneller, was auf eine verringerte Beweglichkeit der Polymerkettenmoleküle hindeutet. Die Bewitterung bedingt somit vermutlich eine Erhöhung der Steifigkeit. Die Ermittlung der Relaxationszeit T_2 erfolgte mit der skaliert, gestreckten Exponentialfunktion (Gleichung 4–6). Bild 5–21 gibt die ermittelten Kennwerte Amplitude, b-Faktor und Relaxationszeit T_2 an. Die Probenbezeichnung ist in Tab. 5–7 erläutert.

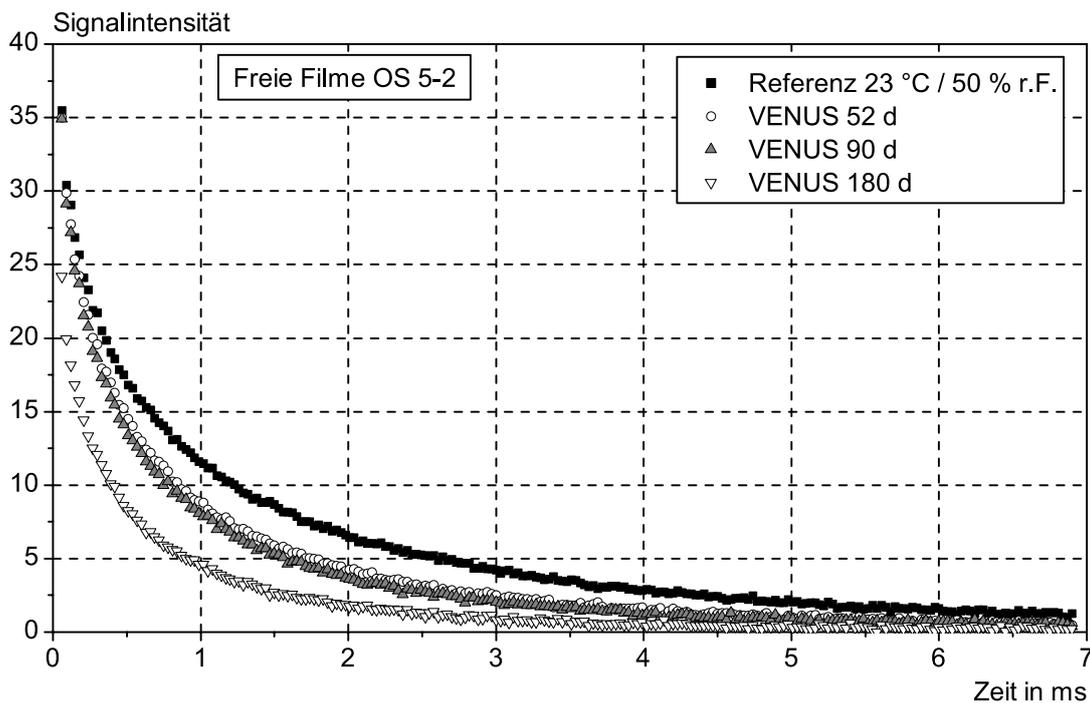


Bild 5–20: T_2 -Zerfallskurven der Freien Filme OS 5-2 vor und nach der VENUS-Bewitterung

Bild 5–21 verdeutlicht den Einfluss der unterschiedlichen Bewitterungen auf die Amplitude, den b-Faktor und die Relaxationszeit T_2 . Während die Amplitude und der b-Faktor im Rahmen der Streuung konstant bleiben nimmt die Relaxationszeit infolge der Bewitterung ab. Mit zunehmender Bewitterungsdauer sinken die Relaxationszeiten. Eine Differenzierung zwischen den Beanspruchungsarten ist nur in sofern möglich, dass nach 180 Tagen Bewitterung in der VENUS der deutlichste Abfall von T_2 , eine Halbierung von 2 auf 1 ms, gegenüber der Referenz auftritt.

Tab. 5–7: Erläuterung der Probenbezeichnung in den Diagrammen

Ref	UV2	UV125	UV250	F2	F4	F80	V52	V90	V180
Unbewittert	UV-Schrank			Frost-Truhe			VENUS		
	2 Zyklen	125 Zyklen	250 Zyklen	2 Zyklen	40 Zyklen	80 Zyklen	52 Tage	90 Tage	180 Tage

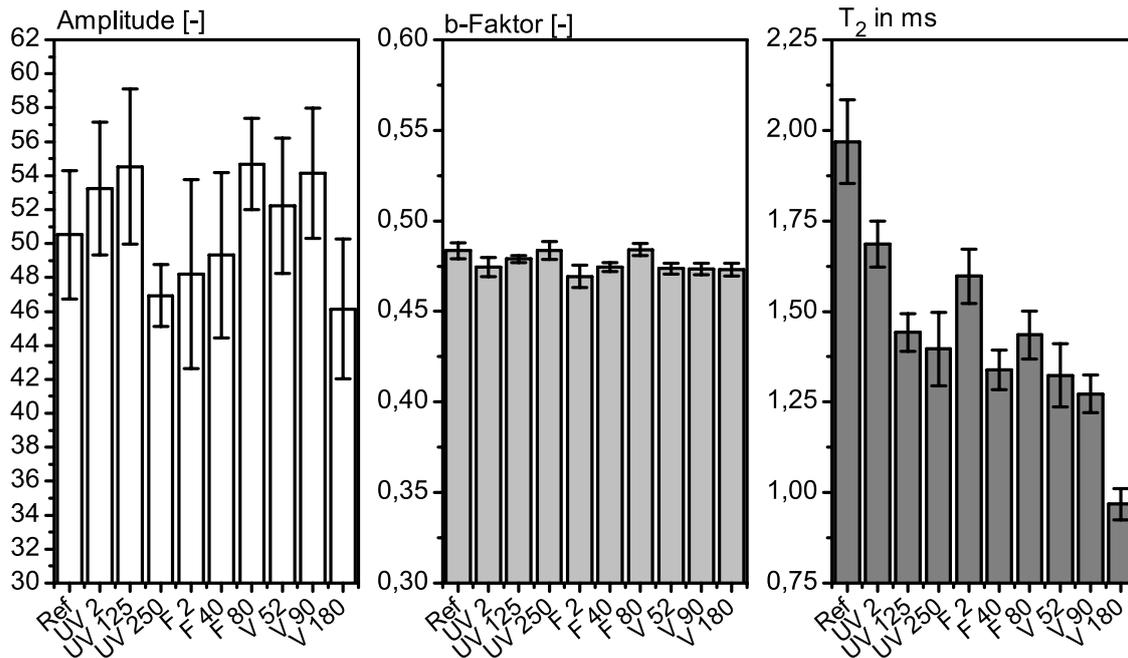


Bild 5-21: Einfluss der Beanspruchung auf Amplitude, b-Faktor und Relaxationszeit T_2 der Freien Filme des OS 5-2 (Mittelwerte und Standardabweichungen, Probenbezeichnung entsprechend Tab. 5-7)

Bild 5-22 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den nach Gleichung 4-6 berechneten Relaxationszeiten und den im Zugversuch ermittelten E-Moduli der Freien Filme. Zwischen diesen beiden Kenngrößen besteht eine nahezu lineare Beziehung: Während der E-Modul infolge zunehmender Bewitterungsdauer ansteigt, nimmt die Relaxationszeit ab. Dies unterstreicht die Abnahme der Relaxationszeit mit ansteigender Materialsteifigkeit.

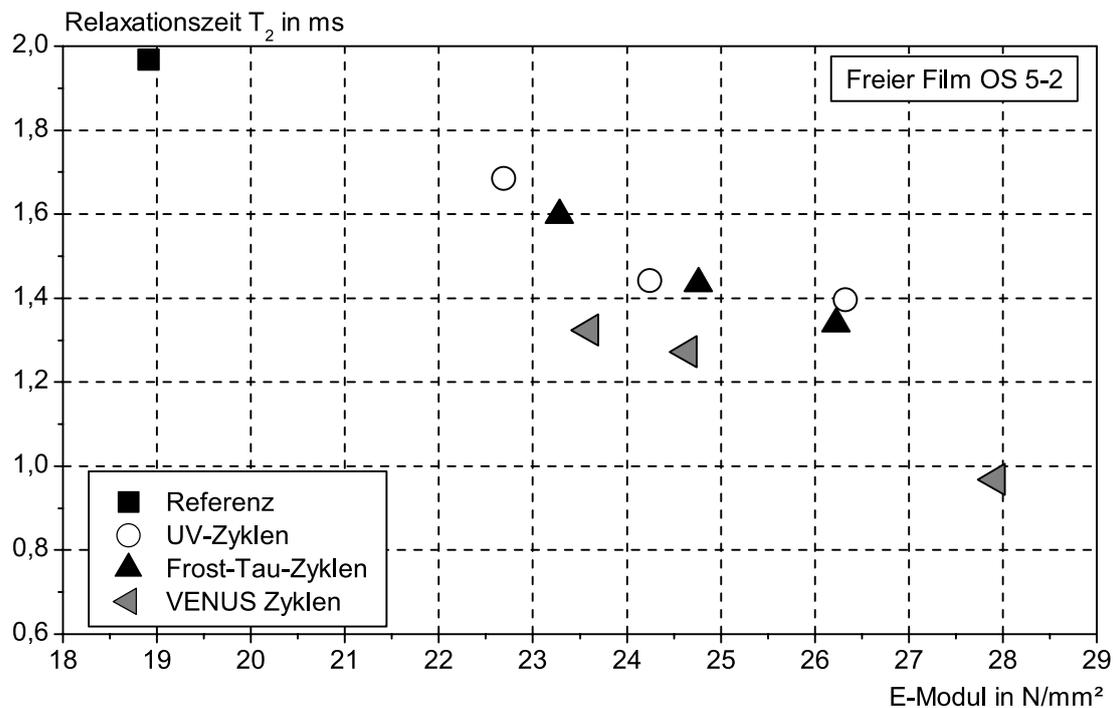


Bild 5-22: Korrelation zwischen E-Modul und Relaxationszeit T_2 der Freien Filme OS 5-2

Bild 5–23 verdeutlicht den Einfluss der unterschiedlichen Bewitterungen auf die Amplitude, den b-Faktor und die Relaxationszeit T_2 des Freien Films OS 5-3 bestehend aus Dispersion W. Während die Amplitude der bewitterten Proben gegenüber der Referenz zunimmt, nehmen der b-Faktor und die Relaxationszeit infolge der Bewitterung ab. Der Anstieg der Amplitude kann auf die Erhöhung der Filmdichte (dichtere Packung durch Interdiffusion) infolge der Temperaturerhöhung während der Bewitterung zurückgeführt werden. Bei der Dispersion W sinken die Relaxationszeiten tendenziell mit zunehmender Bewitterungsdauer. Die Bewitterung in der VENUS hat den stärksten Einfluss auf die Relaxationszeiten. Verglichen zum Freien Film OS 5-2 sind die Relaxationszeiten kürzer. Die kürzeren Relaxationszeiten können mit dem im Vergleich zum OS 5-2 höheren E-Modul erklärt werden (Referenz OS 5-3: 43 N/mm^3).

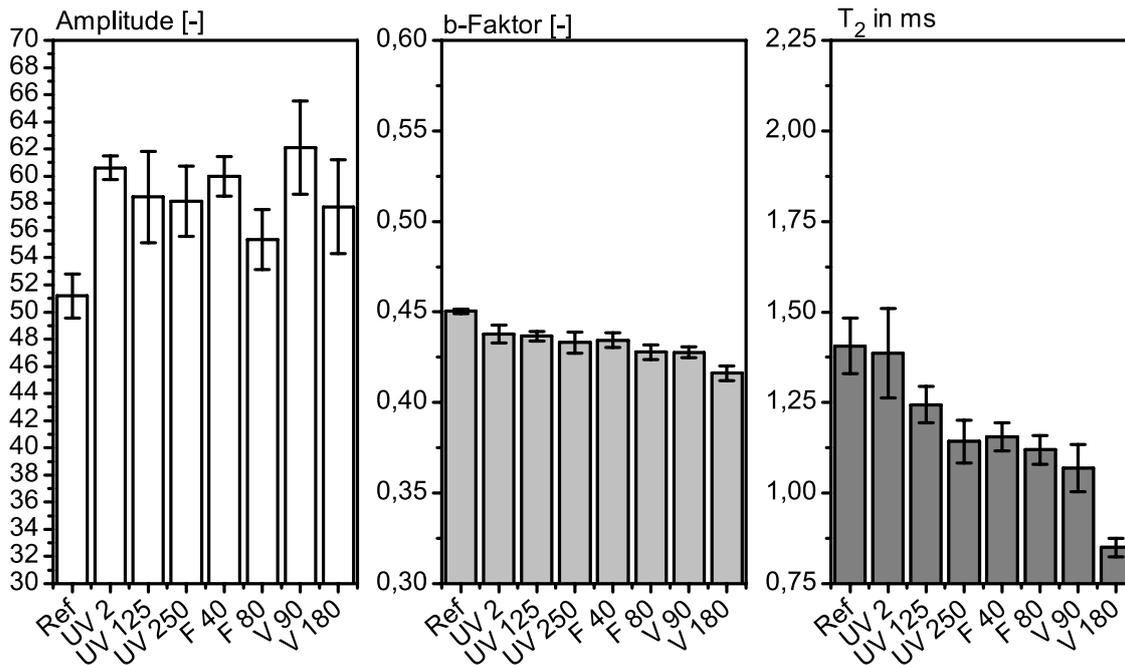


Bild 5–23: Einfluss der Beanspruchung auf Amplitude, b-Faktor und Relaxationszeit T_2 der Freien Filme des OS 5-3 (Mittelwerte und Standardabweichungen, Probenbezeichnung entsprechend Gleichung 4–6)

Ein Vergleich der Relaxationszeiten der Freien Filme des OS 5-3 mit den E-Moduli der Freien Filme zeigt tendenziell ebenfalls eine lineare Abhängigkeit der beiden Kennwerte: Mit zunehmendem E-Modul sinkt die Relaxationszeit. Diese Abhängigkeit tritt jedoch aufgrund der höheren Materialsteifigkeit und den damit verbundenen größeren Streuungen nicht so deutlich in Erscheinung wie beim Freien Film des OS 5-2.

Ein Vergleich der T_2 -Relaxationszeiten (Bild 5–23) mit den Ergebnissen im Bild 5–18 (Freie Filme OS 5-3 vor und während der Freibewitterung in Dusiburg) zeigt eindeutige Abweichungen im Material. Während der unbewitterte Freie Film des neueren OS 5-3 Materials Relaxationszeiten von etwa 1,4 ms aufweist, beträgt die Relaxationszeit des rund 15 Jahre alten OS 5-3 Materials rund 2,27 ms, bei gleichen Messeinstellungen. Dieser Unterschied im identisch benannten Material wird auch durch die deutlich abweichenden E-Moduli bestätigt: Vor rund 15 Jahren wurde an der Referenz ein mittlerer E-Modul von $3,8 \text{ N/mm}^2$ bestimmt, während der E-Modul der in diesem Abschnitt betrachteten Referenz 43 N/mm^2 beträgt. Beim Freien Film des OS 5-2 sind die Änderungen im Material in den letzten 15 Jahren im E-Modul und in der T_2 -Relaxationszeit nicht so gravierend (Referenz vor 15 Jahren: E-Modul: 21 N/mm^2 , T_2 : 1,32 ms; Referenz 2008: $18,5 \text{ N/mm}^2$, T_2 : 1,97 ms).

Bild 5–24 verdeutlicht, dass die Wasserdampfdurchlässigkeit beider Polymerdispersionen infolge der unterschiedlichen Laborbewitterungen abnimmt. Dies deutet ebenfalls auf eine Erhöhung der Filmdichte infolge Bewitterung hin. Eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Bewitterungen ist infolge der Versuchsstreuungen jedoch nicht möglich.

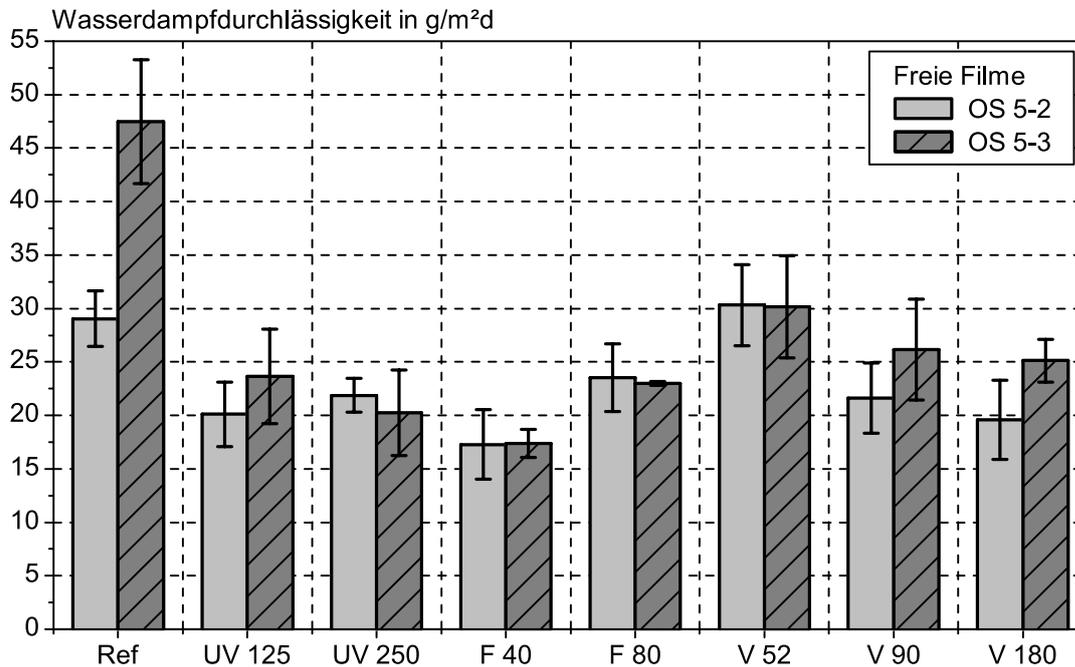


Bild 5–24: Wasserdampfdurchlässigkeit der Freien Filme OS 5-2 und OS 5-3 in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Laborbewitterungen

DETEKTIERTE VERÄNDERUNGEN AN DEN AUF MÖRTELN APPLIZIERTEN POLYMERDISPERSIONEN

Bild 5–25 zeigt Ergebnisse der NMR-Messungen am OS 5-2 System, welches auf einem Mörtel appliziert wurde. Die Messungen wurden mit einer Echozeit von 0,030 ms, einem sensitiven Volumen von 200 μm , 230 Echos, 1250 scans und einer Repetitionszeit von 0,3 s durchgeführt. Die Ermittlung der Relaxationszeit T_2 erfolgte wieder mit der skaliert gestreckten Exponentialfunktion (Gleichung 4–6). Bild 5–25 verdeutlicht den Einfluss der unterschiedlichen Bewitterungen auf die Amplitude, den b-Faktor und die Relaxationszeit T_2 . Während der b-Faktor im Rahmen der Streuung konstant bleibt nimmt die Relaxationszeit in der Tendenz infolge der langfristigen Bewitterung ab. Allerdings tritt die Abnahme von T_2 erst zum letzten Messzeitpunkt auf. Gegenüber der Referenz der Freien Filme des OS 5-2 ist die Relaxationszeit bei den applizierten Systemen halbiert (vergleiche Bild 5–21 mit T_2 -Referenz: ~ 2 ms). Aufgrund des saugfähigen Betonuntergrunds kann das Wasser der frisch applizierten Dispersionen sowohl in den Beton als auch in die Umgebung entweichen, während bei den auf Teflonplatten applizierten Freien Filmen lediglich ein einseitiger Wassertransport möglich ist. Die daraus resultierende höhere Filmdichte der auf Beton applizierten Systeme bedingt in der Tendenz eine höhere Amplitude und eine Abnahme von T_2 . Zudem kann die höhere Filmdichte ein Grund dafür sein, dass sich die Temperaturerhöhung infolge Bewitterung nicht in der Relaxationszeit wieder spiegelt. Die kürzere Relaxationszeit erschwert jedoch auch die Bewertung der Abnahme von T_2 um rund 14 % infolge einer langfristigen Bewitterung. Dies kann auf Materialveränderungen hindeuten.

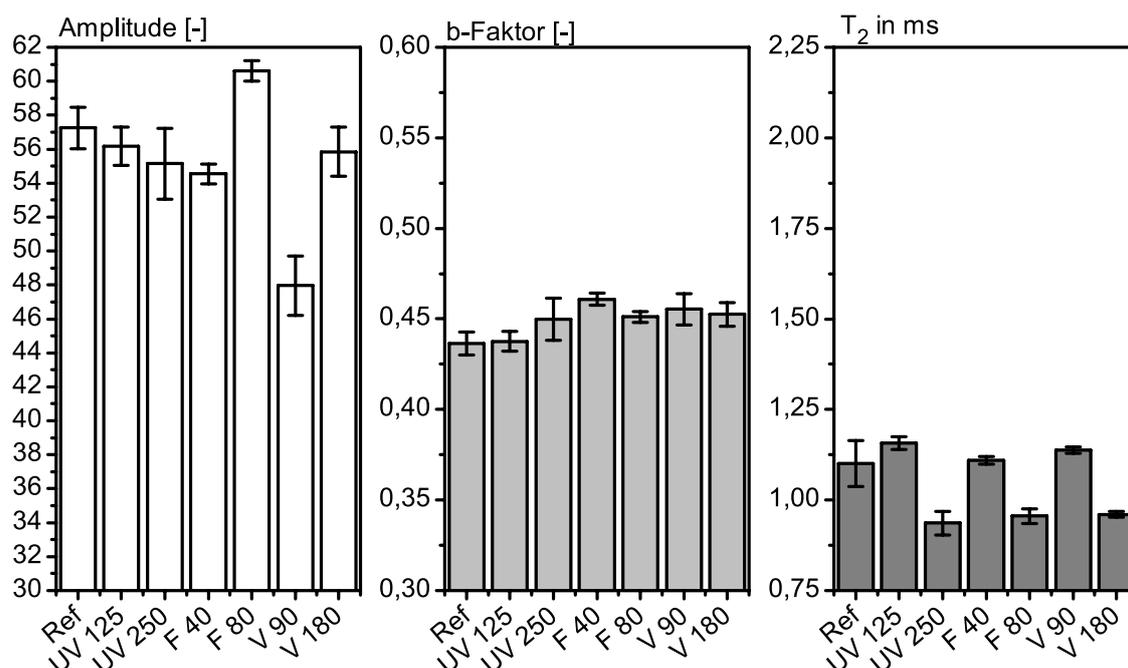


Bild 5–25: Einfluss der Beanspruchung auf Amplitude, b-Faktor und Relaxationszeit T_2 des auf Mörtel applizierten OS 5-2 (Mittelwerte und Standardabweichungen, Probenbezeichnung entsprechend Tab. 5–7)

Im Rahmen eines anderen, bereits im Abschnitt 5.3.3 erwähnten, Forschungsvorhabens */Rau11a/* wurden Betonplatten beschichtet mit den Oberflächenschutzsystemen OS 2 und OS 4, ebenfalls Polymerdispersionen, vor und nach einer beschleunigten Bewitterung in der VENUS (Bild 3–13) hinsichtlich ihrer Dichtheit gegenüber Chloriden und Kohlenstoffdioxid geprüft. Die Bewitterung hatte keinen messbaren Einfluss auf das Eindringen von Chloriden und Kohlenstoffdioxid. Hinsichtlich der Karbonatisierung des Betons unterhalb von Oberflächenschutzsystemen auf Acrylatbasis stellten auch Breitenbücher und seine Mitarbeiter */Bre05/*, */Bre07/* fest, dass die Systeme während einer 20-jähriger Freibewitterung ein Eindringen von Kohlenstoffdioxid weitgehend unterbinden. Die Karbonatisierungstiefe blieb unterhalb von 1 mm. Selbst im Bereich schmaler Risse (bis max. 0,15 mm) konnte die Karbonatisierung auf wenige mm beschränkt werden */Bre07/*.

5.3.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die erläuterten Untersuchungen an den Polymerdispersionen vor, während und nach unterschiedlichen Frei- sowie Laborbewitterungen verdeutlichen, dass sich Materialveränderungen infolge Bewitterungen mit den üblichen Prüfmethode wie Gitterschnitt, Haftzugfestigkeiten und Schichtdicken nicht detektieren lassen. Auch die Einteilung in Rissüberbrückungsklassen ist zur Abbildung von Materialveränderungen nicht ausreichend sensitiv. Die in der Praxis nach mehrjähriger Bewitterung vorliegenden Schäden an Oberflächenschutzsystemen basierend auf Polymerdispersionen deuten jedoch darauf hin, dass es Materialveränderungen geben muss.

Die Analyse freier Filme der Polymerdispersionen anhand von Zugversuchen und Messungen mit der NMR-MOUSE ermöglichen die genauesten Aussagen zu Materialveränderungen. Für die untersuchten Acrylatdispersionen wurde gezeigt, dass der E-Modul infolge Bewitterung ansteigt. Diese Materialveränderung wurde ebenfalls mit der NMR-MOUSE detektiert. Der Anstieg des E-Moduls

steht in einer linearen Beziehung zur Abnahme der Relaxationszeit T_2 . Je höher der E-Modul der Acrylatdispersion ist, umso geringer ist die Relaxationszeit und umso schwieriger ist es eine weitere Abnahme der Relaxationszeit infolge Bewitterung zu detektieren. Dies wurde zum einen am Freien Film des OS 5-3 gezeigt. Zum anderen ist dies jedoch auch bei der Applikation der Dispersionen auf saugende Untergründe, wie Mörtel/Beton, und der mit der schnelleren Abtrocknung verbundenen engeren Kugelpackung der Dispersionen der Fall.

Wird an beschichteten Rissüberbrückungsprismen im Zugversuch die maximal überbrückbare Rissbreite ermittelt, so kann auch hierüber eine Zunahme der Materialsteifigkeit (Abnahme der Rissüberbrückungsfähigkeit) infolge einer Bewitterung festgestellt werden. Zur Erhöhung der Aussagekraft sollten jedoch mindestens vier Einzelversuche je Parameter durchgeführt werden.

Aktuell wird untersucht inwiefern ein oberflächennaher Abbau der Polymerdispersionen infolge Bewitterung mittels tiefenabhängiger NMR-Messungen bestimmt werden kann. Hierfür werden Auflösungen $\leq 50 \mu\text{m}$ angestrebt. Eine Voraussetzung ist allerdings, dass die Oberflächen der Polymerdispersionen keine Oberflächenstruktur z. B. infolge Applikation mit Lammfellrolle, aufweisen. Wünschenswert wäre zudem eine Weiterentwicklung der NMR-MOUSE dahin gehend, dass die Echozeiten kürzer werden.

5.4 ELASTISCHE DICHTUNGSSCHLÄMMEN ALS OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

5.4.1 UNTERSUCHTE ELASTISCHE DICHTUNGSSCHLÄMMEN

Im Rahmen zweier Forschungsvorhaben /Rau09a/, /Rau09b/ werden seit über 12 Jahren zwei unterschiedliche elastische Dichtungsschlämmen frei bewittert. Die Materialien, bei denen es sich um am Markt verfügbare Produkte handelt, sind in Tab. 5–8 aufgeführt. Bei den auf Beton bzw. Mörtel applizierten Dichtungsschlämmen handelt es sich um OS 5b Systeme, entsprechend Bild 2–20. Die hwO besteht aus 2 bzw. 3 Lagen der Dichtungsschlämme. Ein Feinspachtel und eine Deckversiegelung wurde nicht aufgebracht.

Tab. 5–8: Übersicht über die untersuchten elastischen Dichtungsschlämmen

Bezeichnung	Material	Hauptpolymer	Lagenanzahl
C1	Polymer-Zement-Gemisch; 2 Komponenten	Acrylsäureester-Copolymer	2lagig
C2			3lagig
D1		Acrylatdispersion	2lagig
D2			3lagig

Als Untergründe für die Oberflächenschutzsysteme wurden Probekörper aus Mörtel und Beton hergestellt. Angaben zu den Untergründen befinden sich in Tab. 5–9. Aus dem Mörtel wurden Rissüberbrückungsprismen und Platten hergestellt. Aus den Betonen wurden großformatige Platten hergestellt. Aus den in Tab. 5–8 aufgeführten Dichtungsschlämmen wurden zudem bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte Freie Filme auf mit Teflon beschichteten Glasplatten hergestellt.

Tab. 5–9: Übersicht über die zementgebundenen Untergründe

Bezeichnung	Zementart	Zementmenge	w/z	Größtkorn
Mörtel	CEM I 52,5 R	1 Teil Zement / 3 Teile Sand	0,5	CEN Normsand
Beton I	CEM I 42,5 R (PZ 45 F)	460 kg/m ³	0,4	8 mm
Beton II	CEM III/B 32,5 N LH/SR (HOZ 35L-NW-HS-NA)	350 kg/m ³	0,47	16 mm

5.4.2 DURCHGEFÜHRTE FREIBEWITTERUNGEN UND UNTERSUCHUNGEN

Die Dichtungsschlämmen wurden zum einen im Rahmen des bereits in Abschnitt 5.3.2 dargestellten Forschungsvorhabens auf Sylt und in Duisburg bewittert. Zum anderen erfolgte die Bewitterung an Meer- und Süßwasserbauwerken. Tab. 5–10 und Tab. 5–11 geben einen Überblick über die in den zwei unterschiedlichen Projekten durchgeführten Bewitterungen.

5

Tab. 5–10: Standorte der Außenbewitterung, mit einer Eingruppierung der Beanspruchung

Auslagerungsort			Beanspruchung							
Bez	Beschreibung	Zone	Wasserart		Ständig unter Wasser	Wasserwechsel	Spritz-/Sprüh-Wasser	Freie Bewitterung	Frost	Eisgang
			Süßwasser	Meerwasser						
Ei	Eidersperrwerk (Nordsee)	X1		x		x		x	x	x
		X2		x			x	x	x	
Ef	Eckernförde (Ostsee)	X3		x	x					
		X4		x		x		x	x	x
		X5		x			x	x	x	
Gh	Geesthacht (Elbe)	X6	x		x					
		X7	x			x		x	x	x
		X8	x					x	x	
K	Karlsruhe	X9							x	
S	Sylt							x	x	
D	Duisburg							x	x	

Tab. 5–11: Übersicht über die Laborbewitterungen

Bezeichnung	Beschreibung
KB 1	Bewitterung mit UV-Strahlung entsprechend Tabelle 5-6, 1240 h
KB 2	Bewitterung mit UV-Strahlung entsprechend Tabelle 5-6, 2480 h
FTS	Frost-Tausalz-Beanspruchung entsprechend Tabelle 5-6
WL-M	Wechselagerung: 8 h Wasser, 16 h Luft, 24 h Wasser, 24 h Luft, 32 h Wasser, 64 h Luft (Wasser: M = Meerwasser, S = Süßwasser / Luft: 23 °C, 50 % relative Luftfeuchte)
WL-S	

Die Untersuchung der Proben auf Sylt und in Duisburg erfolgten nach 3, 5 und 12 Jahren, während

die Untersuchungen an den am Wasser bewitterten Proben nach rund 4 und 7 Jahren durchgeführt wurden. Nach bzw. während den jeweiligen Entnahmen der Proben wurden die Erscheinungsbilder betrachtet, die Haftzugfestigkeiten ermittelt und der Chloridgehalt im Beton untersucht. Zudem wurden Zugversuche an Freien Filmen durchgeführt.

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit an den auf Sylt und in Duisburg ausgelagerten Proben erfolgte entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 5.3.2. Bei den großformatigen Betonplatten die an den Wasserbauwerken und in Karlsruhe bewittert wurden, erfolgte die Entnahme von Bohrkernen mit einem Durchmesser von 10 cm. Vor der Ermittlung der Haftzugfestigkeiten wurden die Bohrkern im Fußbad bis zur Massenkonstanz gelagert. Die Durchführung der Haftzugversuche erfolgte entsprechend Abschnitt 3.4.4.

Zugfestigkeit und Reißdehnung der Schlämmen wurden an Streifenproben von 15 mm Breite und 200 mm Länge ermittelt. Die Einspannlänge betrug bei dem weggesteuerten Zugversuch 120 mm. Im Zugversuch wurde zunächst eine Vorspannung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht. Bis zum Erreichen einer Dehnung von 2 % wurde die Probe mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min, danach mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min bis zum Bruch beansprucht. Anhand des aufgezeichneten Kraft-Dehnungs-Verlaufs wurden Bruchspannung und Bruchdehnung für jeden Probekörper ermittelt. Pro Variante wurden 5 bzw. 6 Streifenproben geprüft.

5.4.3 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

ERGEBNISSE DER VISUELLEN BEURTEILUNG

Die visuelle Veränderung der freibewitterten, auf Beton applizierten Schlämmen variiert mit den Auslagerungstandorten. Bild 5–26 gibt eine Übersicht über das Aussehen der Proben nach einer 12jährigen Freibewitterung auf Sylt und in Duisburg. Die Proben wurden ungereinigt und gereinigt fotografiert. Die Reinigung erfolgte händisch mittels Wasser und einer Borstenbürste. Die auf Sylt ausgelagerten Proben weisen einen starken Flechtenbewuchs auf, während bei den in Duisburg ausgelagerten Platten vollflächige Schmutzablagerungen dominieren. Im Vergleich zu den OS 5a-Systemen (Bild 5–14) sind der Bewuchs und die Ablagerungen bei den Schlämmen stärker ausgeprägt.

Sowohl Flechtenbewuchs als auch Schmutzablagerungen sind durch eine Reinigung weitgehend entfernbar. Allerdings bleiben lokale Schattierungen an den Oberflächen zurück und die Oberflächen erscheinen leicht aufgeraut. Eine Schädigung in tiefer gehenden Schichten war an den Schnittflächen unter dem Mikroskop nicht erkennbar. Risse, Blasen oder Ablösungen vom Betonuntergrund wurden nicht festgestellt.

Vergleichend ist der Flechtenbewuchs auf Sylt bei Schlämme C gegenüber Schlämme D geringer. Auch der Verschmutzungsgrad in Duisburg ist bei Schlämme C etwas geringer. Beide Schlämmen lassen sich nach 12 Jahren Freibewitterung noch mit dem Fingernagel eindrücken.

Die an den Wasserbauwerken angebrachten Schlämmen C und D sind sowohl nach 4 als auch nach 7 Jahren ebenfalls noch so elastisch, dass sie sich mit dem Fingernagel eindrücken lassen. In den Bereichen, die ständig unter Meereswasser sowie in der Meereswasserwechselzone liegen, ist bei beiden Schlämmen ein flächiger Seepockebewuchs vorhanden. Die Seepocken hinterlassen Vertiefungen in den Schlämmen, die mit zunehmender Beanspruchungsdauer tiefer werden. Schlämme D weist im Bereich unter Süßwasser (Geesthacht) Blasen auf. Nach 7 Jahren haben die Blasen einen Durchmesser von ca. 5 mm. Das Öffnen der geschlossenen Blasen ergab Schichtdicken für die Blasen von rund 0,3 mm. Unter den geöffneten Blasen ist Schlämme mit einer Schichtdicke von etwa 2 mm vorhanden.

In der Wasserwechselzone sowie im frei bewitterten Bereich traten in Geesthacht hingegen keine Auffälligkeiten auf.

Die Betrachtung der Bohrkernoberflächen mittels Mikroskop im Labor ergab, dass Schlämme C in einigen Bereichen feine Risse mit Rissbreiten von 10 bis 20 μm aufweist. Bei Schlämme D treten solche Risse ebenfalls, aber seltener auf. Eindeutige systemspezifische Erscheinungen wurden nicht festgestellt. Eine Verschmutzung der Schlämmen infolge Freibewitterung wurde nicht festgestellt.

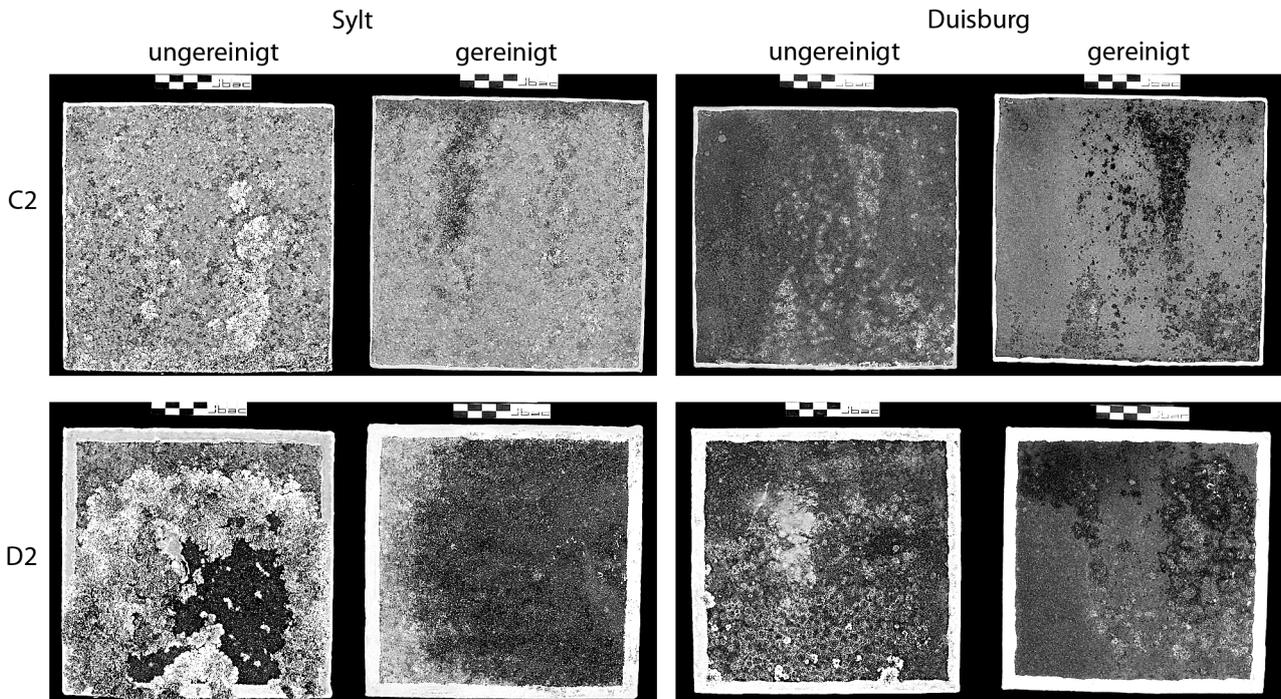


Bild 5-26: Erscheinungsbild der freibewitterten, beschichteten Betonplatten vor und nach der Reinigung mit Wasser und Bürste

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER MAXIMALEN DEHNUNG FREIER FILME

Bild 5-27 zeigt für die Freien Filme der Dichtungsschlämmen C1 und D1 eine Abnahme der maximalen Dehnung infolge der Bewitterungen. Für beide Forschungsvorhaben sind die Referenzen (Lagerung bei 23 °C / 50 % r. F.; Ref a /Rau09a/ und Ref b /Rau09b/) dargestellt. Die maximalen Dehnungen der Referenzen sind im Rahmen der Streuung auf einem Niveau, wobei die Schlämme D1 80 % mehr Dehnung macht als C1. Infolge der künstlichen Bewitterung und der Bewitterung auf Sylt sowie in Duisburg nimmt die maximale Dehnung beider Schlämmen infolge zunehmender Bewitterungsdauer ab. Allerdings sinkt die maximale Dehnung der Schlämme C1 stärker und der Abfall mit zunehmender Bewitterungsdauer ist eindeutiger als bei Schlämme D1. So beträgt die maximale Dehnung der Schlämme C1 nach 5 Jahren auf Sylt nur noch 6 % (Referenz 30 %).

Infolge der Wasserwechsellagerungen nimmt die maximale Dehnfähigkeit der Schlämmen ebenfalls ab. Demnach bedingt auch der ständige Wechsel zwischen nass und trocken bei gleich bleibender Temperatur (23 °C) eine Reduktion der Dehnfähigkeit. Auffallend ist hierbei weiterhin, dass diesmal die Schlämme D1 im Vergleich zur C1 wesentlich stärker an Dehnfähigkeit infolge der Nass/Trockenbeanspruchung verliert. Infolge der Meerwasser/Trockenbeanspruchung sinkt die Dehnfähigkeit der D1 Schlämme am stärksten.

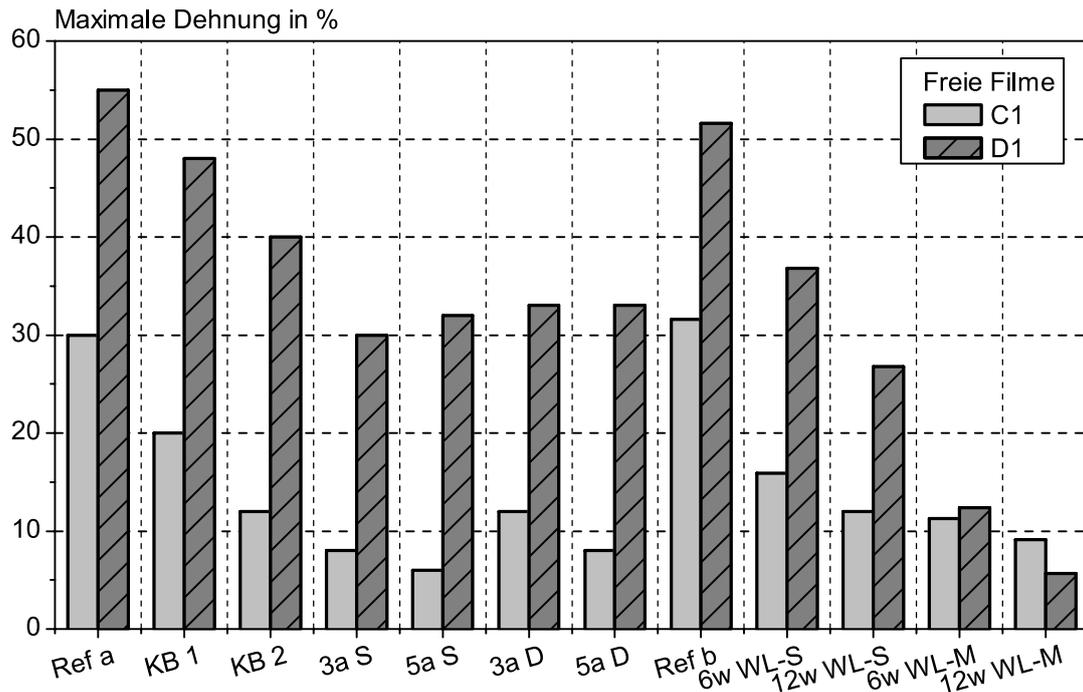


Bild 5-27: Maximale Dehnung in Abhängigkeit von der Beanspruchung. Ermittelt im Zugversuch an Freien Filmen

Die Abnahme der maximalen Dehnung der Schlämmen spiegelt sich in der Tendenz auch in der Rissüberbrückungsfähigkeit der C2 und D2 Schlämmen auf Mörtelprismen wider. Nach einer 12jährigen Auslagerung erreicht D2 auf Sylt und C2 in Duisburg nicht mehr die geforderte Rissüberbrückungskategorie I_T (vergleichbar mit B 2 nach DIN EN 1062-7, Tab. 3–13).

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER HAFTZUGFESTIGKEITEN

Bild 5-28 zeigt die Haftzugfestigkeiten der 3lagig aufgebrauchten Schlämmen auf Beton I nach unterschiedlichen Laborbewitterungen sowie der Freibewitterung auf Sylt und in Duisburg. Die Schlämme C weist im Vergleich zur Schlämme D höhere Haftzugfestigkeiten auf. Da die Bruchbilder überwiegend zwischen Beton und OS-Schicht bzw. in den OS-Schichten auftraten, kann dieses Ergebnis auf Unterschiede im Material bzw. im Adhäsions- und Kohäsionsverhalten zurückgeführt werden. Bei Schlämme C steigt die Haftzugfestigkeit infolge Bewitterung an, eine zeitliche Entwicklung ist nicht zu erkennen. Tendenziell gilt das Gleiche für die Schlämme D, nur ist hier der Anstieg der Haftzugfestigkeit infolge der Bewitterung geringer.

Die Haftzugfestigkeiten und Bruchbilder der 2lagig aufgebrauchten Schlämmen C und D, die an den Wasserbauwerken Eidersperrwerk, Eckernförde, Geesthacht und in Karlsruhe bewittert wurden, sind in Bild 5-29 zusammengestellt. Die Erläuterung der Legende ist in Tab. 5-10 gegeben. Bei beiden Schlämmen ist keine signifikante Veränderung der Verbundfestigkeiten infolge der unterschiedlichen Beanspruchungen sowie Beanspruchungsdauern festzustellen. Ausnahme ist ggf. die Zunahme der Haftzugfestigkeiten der Schlämme C nach Lagerung unter Wasser. Allerdings scheint durch die permanente Wasserlagerung im Wesentlichen die Zugfestigkeit des Beton II zu steigen. Die Leistungsfähigkeit der Schlämme C kann bei einem überwiegenden Betonbruchanteil nicht direkt beurteilt werden.

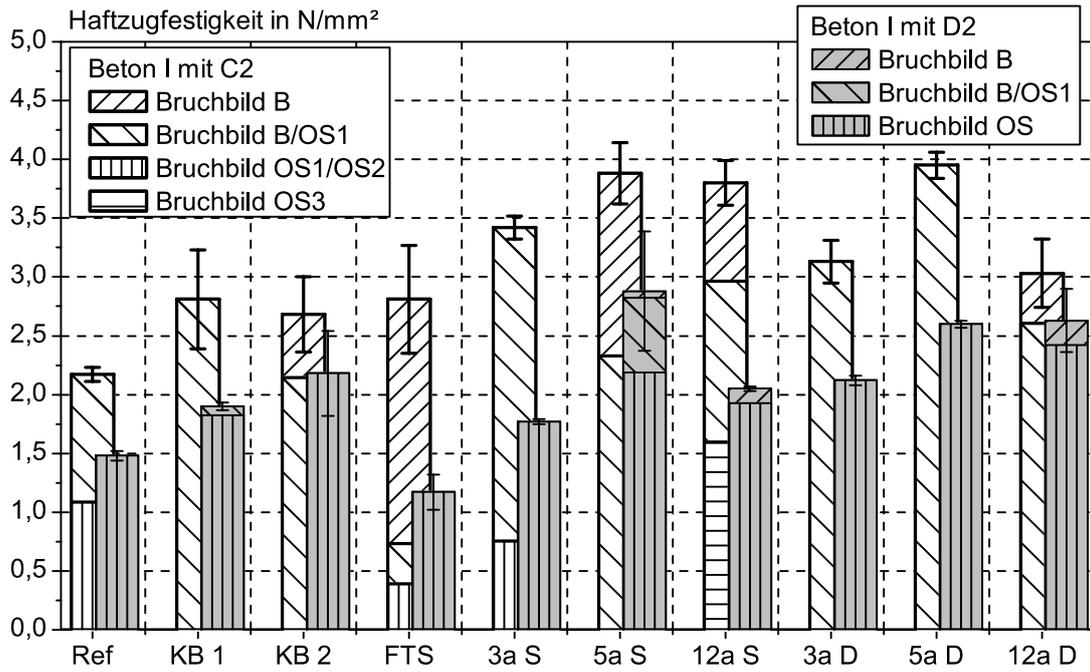


Bild 5-28: Haftzugfestigkeiten und Bruchbilder der Schlämme C und D nach unterschiedlichen Laborlagerungen sowie Freibewitterungen auf Sylt und in Duisburg (B: Beton, OS: Oberflächenschutzschichten; ausführliche Erläuterung in Abschnitt 3.4.4)

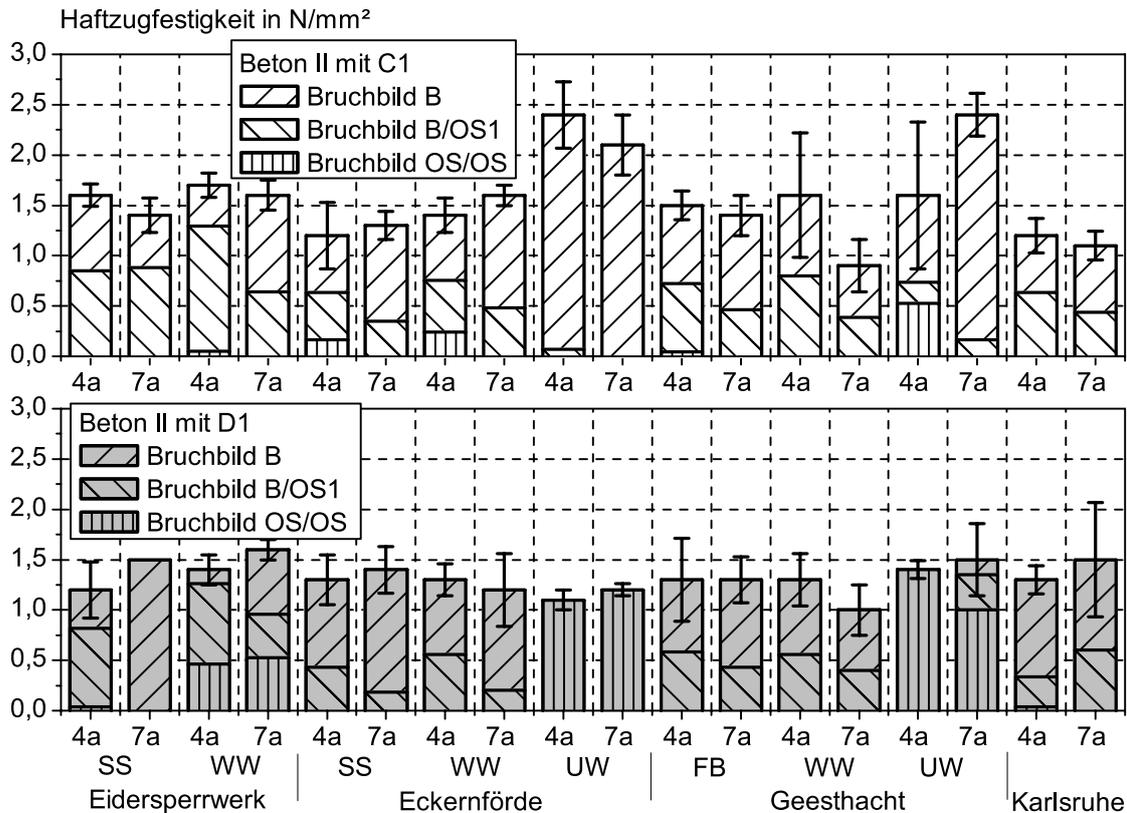


Bild 5-29: Haftzugfestigkeiten und Bruchbilder der Schlämme C und D nach unterschiedlichen Freibewitterungen entsprechend Tab. 5-10 (SS: Spritz-/Sprühwasser, WW: Wasserwechsel, UW: Unter Wasser, FB: Freie Bewitterung, B: Beton, OS: Oberflächenschutzschichten)

Ein Vergleich der Haftzugfestigkeiten in Bild 5–28 mit den Werten in Bild 5–29 verdeutlicht, dass das Niveau der Haftzugfestigkeiten der Schlämmen auf dem nassen Beton II geringer ist als auf dem trockenen Beton I. Dies kann auf die unterschiedlichen Betonqualitäten/Betonzugfestigkeiten zurückgeführt werden. Dementsprechend treten beim Beton II auch in nahezu jedem Bruchbild anteilig Betonbrüche auf. Tendenziell tritt jedoch bei allen Bewitterungen in der Schlämme D häufiger ein Kohäsionsversagen auf als in der Schlämme C. Infolge einer unter Wasser Beanspruchung tritt das Kohäsionsversagen in der Schlämme D bereits bei Haftzugfestigkeiten von etwa 1 N/mm^2 auf.

Beide Schlämmen erfüllen auch nach den unterschiedlichen Bewitterungen die Anforderungen der RL-SIB /DAf01/ und ZTV-W LB 219 /ZTVW/ hinsichtlich der Haftzugfestigkeiten eines OS 5b ohne Feinspachtel. Die Bewitterungen werden fortgeführt, um die Haftzugfestigkeiten nach etwa 20jähriger Freibewitterung nochmals zu bestimmen.

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DES CHLORIDGEHALTES IM BETON UNTERHALB DER BESCHICHTUNGEN

Die am bzw. im Meerwasser gelagerten Betonplatten mit den Schlämmen C und D wurden nach 4 und 7 Jahren hinsichtlich des Chloridgehaltes im Beton untersucht. Dazu wurde Betonmehl aus den Tiefen 0 bis 8 mm und 12 bis 20 mm analysiert. Die angegebenen Tiefenlagen beginnen an der Betonoberfläche. Sowohl nach 4 als auch nach 7 Jahren wurde weder am Eidersperrwerk noch in Eckernförde ein nennenswerter Anstieg des Chloridgehaltes im Beton festgestellt. Der Chloridgehalt befindet sich mit etwa 0,015 M.-% auf dem Niveau des Betons.

5.4.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Zugversuche an den Freien Filmen zeigen eine deutliche Abnahme der maximalen Dehnung, und damit bei steigender Bruchspannung eine Zunahme der Materialsteifigkeit, infolge der Bewitterungen. Mit zunehmender Bewitterungsdauer sinkt die maximale Dehnbarkeit des Materials. Dieses Ergebnis spiegelt sich tendenziell im Abnehmen der Rissüberbrückungsfähigkeit und in der Entstehung von Mikrorissen an der Schlämmenoberfläche wider.

Beide Schlämmen sind jedoch auch nach 7 bzw. 12jähriger Freibewitterung unter den unterschiedlichsten Beanspruchungen vollkommen funktionstüchtig. Eine Untersuchungsmethode anhand derer eine fortschreitende Schädigung der Schlämmen detektiert werden könnte liegt nicht vor. Die Leistungsfähigkeit der NMR-MOUSE zur Charakterisierung der Schlämmen anhand tiefenabhängiger T_2 -Bestimmungen sollte bei den nächsten Untersuchungen an den zur Zeit noch in der Bewitterung befindlichen Proben ermittelt werden.

6. BEFAHRBARE OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

6.1 ALLGEMEINES

Befahrbare Oberflächenschutzsysteme beinhalten heutzutage immer Reaktionsharze wie Epoxidharz und ggf. Polyurethane. Zumindest die Grundierung der Systeme besteht aus Epoxidharzen. Danach können Bitumen und Asphalt (Brückenabdichtungen, Bild 2–22 bis Bild 2–24) oder weitere Epoxidharz- bzw. Polyurethanschichten folgen (OS 8, OS 11, OS 13, Bild 2–20 und Bild 2–21).

Bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit dieser Systeme gibt es drei wesentliche Kernthemen: Blasenbildung in den Oberflächenschutzsystemen, Verschleiß sowie Eindringwiderstand gegenüber Chloriden und Kohlenstoffdioxid. Die beiden letztgenannten Themen werden häufig im Zusammenhang mit Parkbauten diskutiert, da dort extrem hohe Beanspruchungen vorliegen.

Zu den Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton hat Herr Dr. Wolff in der Arbeitsgruppe „Erhaltung und Instandsetzung“ promoviert */Wol09/*. Die Essenz seiner Arbeit ist in Bild 3–7 dargestellt.

Im Abschnitt 6.2 werden Untersuchungen zur langfristigen Haftung des OS 7 bzw. Teilbereiche einer Brückenabdichtung erläutert. Der Abschnitt 6.3 widmet sich den Parkhausbeschichtungen inklusive dem Verschleiß sowie Eindringwiderstand gegenüber Chloriden und Kohlenstoffdioxid. Hierbei wird sich nicht auf Laboruntersuchungen sondern auf Untersuchungen an verschiedenen Parkhäusern bezogen.

6.2 LANGFRISTIGE HAFTUNG DES OS 7 BZW. TEILBEREICHE EINER BRÜCKENABDICHTUNG

6.2.1 EINFLUSS DES THERMOSCHOCKS

Die Grundierung der OS 7 Systeme erfährt bei Brückenabdichtungen nach ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 1 (Bild 2–22) durch das Aufbringen einer Dichtungsschicht aus Bitumen-Schweißbahn schockartig und kurzzeitig sehr hohe Temperaturen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens */Rau05/* wurde untersucht, inwiefern dieser Thermoschock die Haftung der Grundierung zum Beton beeinflusst. Tab.

6-1 zeigt den Parameterplan für diese Untersuchungen. Auf zwei Betonen mit unterschiedlichen Rautiefen wurden drei Grundierungen appliziert. Die Haftzugfestigkeiten wurden anhand jeweils 10 Einzelversuchen vor und nach dem Grundieren sowie nach der thermischen Beanspruchung bestimmt.

Tab. 6-1: Versuchsprogramm mit Angabe der Prüfstellen zur Bestimmung der Haftzugfestigkeiten /Rau05/

Beton		C 30/37															C 35/45															
Rautiefe		0	klein			mittel			groß									0	klein			mittel			groß							
Oberflächen- vorbereitung		0	K			K			FW+K			FK+K			FW			0	K			K			FK+K							
Grundierung		1	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Zeit- punkt der Prü- fung	vor dem Grun- dieren	10		10			10			10			10			10			10		10			10			10			10		
	Nach dem Grun- dieren	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
	Nach der therm. Bean- spru- chung	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Summe Prüfstellen		380															240															

FK: Fräsen mit Klopfräse

FK+K: Fräsen mit Klopfräse und anschließendes Kugelstrahlen

FW: Fräsen mit Walzenfräse

FW+K Fräsen mit Walzenfräse und anschließendem Kugelstrahlen

K: Kugelstrahlen

Rautiefe: angestrebte Bereich: klein: 0,2-0,3 mm; mittel: 0,5-0,6 mm; groß: 0,6-0,9 mm nach dem Sandflächenverfahren

Der Einfluss der Oberflächenvorbereitung auf die Haftzugfestigkeiten des Betons ist in Bild 3-8 dargestellt. Die Grundierungen decken mit 500, 830 und 750 mPas den gesamten Viskositätsbereich der nach TL-BEL-EP /BELEP/ zertifizierten Grundierungen ab. Die Auftragsmenge der Epoxidharze betrug je nach Betonrauheit 200 bis 500 g/m². Zum Absanden wurden rund 750 g/m² Quarzsand der Körnung 0,2/0,7 verwendet.

Haftzugversuche an Abdichtungen mit Bitumen-Schweißbahn und Gussasphalt bedingen überwiegend Brüche oberhalb der Grundierung. Im Rahmen dieser Untersuchungen sollte jedoch der Einfluss der Thermoschocks auf die Grundierung betrachtet werden. Somit wurden Bitumen-Schweißbahn und Gussasphalt jeweils mittels Aluminiumfolien von den Untergründen getrennt, um diese rückstandslos wieder von der Grundierung zu trennen und abschließend Haftzugversuche nur an den grundierten Betonkörpern durchführen zu können. Das Aufschweißen einer Bitumen-Schweißbahn wurde 12 Tage nach dem Grundieren simuliert. Dafür wurde die Schweißbahnrolle in dem verwendeten Aufschweiß-Verlegegerät durch einen Stahlzylinder ersetzt und hinter dem Stahlzylinder eine Bitumenschweißbahn mit Aluminiumkaschierung abgerollt. Die Einstellungen am Aufschweiß-Verlegegerät sowie die Vorschubgeschwindigkeit wurden aus entsprechenden Vorversuchen übernommen.

Vergleichsmessungen zur Temperatur auf der Grundierungsoberfläche bei den Aufschweiß-Vorversuchen mit einer realen Bitumen-Schweißbahn und bei der Simulation des Aufschweißens an jeweils 2 Messstellen zeigen, dass die Temperaturentwicklung bei der Simulation der thermischen Belastung beim realen Aufschweißen entspricht (Bild 6–1, links). Der Gussasphalt wurde 16 Tage nach dem Grundieren in einer Dicke von 35 mm auf die Bitumen-Schweißbahn aufgebracht. Die Temperatur am Auslauf des Gussasphalt-Kochers betrug 253 °C /Rau05/.

Bild 6–1, links, zeigt den Temperaturverlauf an der Grundierungsoberfläche während des Aufschweißens der Bitumen-Schweißbahn. Bild 6–1, rechts, verdeutlicht, dass diese temporären Temperaturen von bis zu 700 °C die Haftzugfestigkeiten der drei Grundierungen zum Beton C 30/37 nicht signifikant beeinflussen. Das hier dargestellte, exemplarische Ergebnis gilt für alle Versuchparameter: Die Haftzugfestigkeiten vor und nach dem Grundieren unterscheiden sich nicht signifikant und nach der thermischen Beanspruchung sind die Haftzugfestigkeiten in allen Fällen nicht geringer als davor.

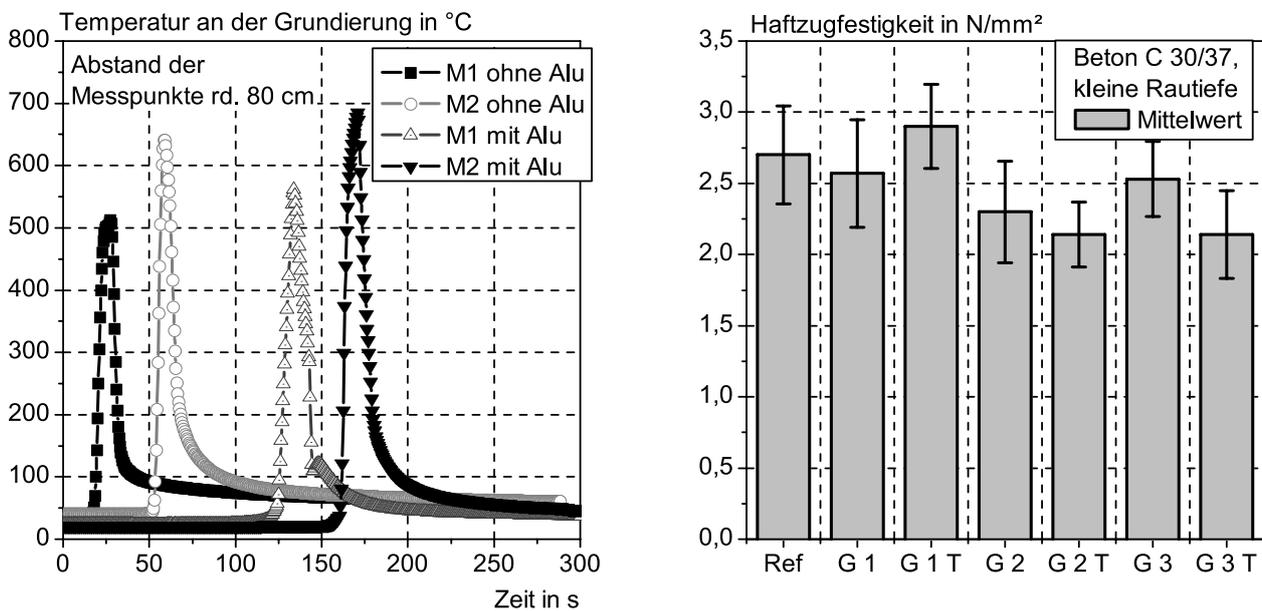


Bild 6–1: Links: Temperaturentwicklung auf der Grundierungsoberfläche beim realen (ohne Alu) und simulierten (mit Alu) Aufschweißen der Bitumenschweißbahn. Rechts: Haftzugfestigkeit des Betons (Ref) und Haftzugfestigkeiten der grundierten Betone vor (G 1, G 2, G 3) und nach dem Aufbringen der Bitumenschweißbahn und des Gussasphalts (G 1 T, G 2 T, G 3 T).

6.2.2 EINFLUSS RÜCKSEITIGER DURCHFUCHTUNG

EINLEITUNG

Anlässlich von Schadensbildern wie Adhäsionsminderung, Adhäsionsverlust, Blasenbildungen in der Grenzfläche von Beton und Dichtungsschicht bei Trogbauwerken wurde das nachfolgend erläuterte Forschungsvorhaben /Sas97/ initiiert. Zudem wurde bei einer Bestandsaufnahme an 9 Trogbauwerken festgestellt, dass der Wassergehalt des Konstruktionsbetons des Troges unterhalb der Abdichtung in nahezu allen Fällen im Bereich der Wassersättigung lag.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte überprüft werden, inwieweit

- Die Adhäsionsfestigkeit zwischen der durchfeuchteten Betonunterlage und handelsüblichen, nach TL-BEL-EP zugelassenen Epoxidharzversiegelungen dauerhaft ist,
- eine diesen Epoxidharzversiegelungen vorgeschaltete Hydrophobierung der Betone geeignet ist, das Adhäsionsverhalten bei rückseitiger Durchfeuchtung des Betons zu verbessern.

VERSUCHSPARAMETER

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Epoxidharze mit verschiedenen Hydrophobierungen kombiniert. Es ergaben sich die sechs folgenden Kombinationen:

- A. ohne Hydrophobierung/Epoxidharz I
- B. 100 %ige Silan/Siloxan Hydrophobierung / Epoxidharz I
- C. Wässrige 12,5 %ige Silan/Siloxan Hydrophobierung / Epoxidharz I
- D. 100 %ige Isobutylsilanhydrophobierung / Epoxidharz I
- E. Lösemittelhaltige Acrylat/Siloxanhydrophobierung / Epoxidharz I
- F. Wässrige 12,5 %ige Silan/Siloxan Hydrophobierung / Epoxidharz II

Die verwendeten Betonrezepturen sind in Tab. 6–2 angegeben. Vor Auftrag der Epoxidharze wurden die Schalungsflächen der Probekörper durch Sandstrahlen vorbereitet. Die im Sandflächenverfahren nach Kaufmann ermittelte Rauhtiefe betrug etwa 0,8 mm. Die Probekörper waren 200 mm lang, 200 mm breit und 70 mm hoch. Auf die trockenen Betonoberflächen (Vorlagerung Klima, Tab. 6–3) wurden 160 bis 190 g/m² Hydrophobierung appliziert, während die rückseitig durchfeuchteten Betone nur rund 115 g/m² (C 20/25, Tab. 6–3) bzw. rund 140 g/m² (C 30/37, Tab. 6–3) aufnahmen. Die Epoxidharze wurden ebenso wie die Hydrophobierungen im jeweiligen Klima der Vorlagerung in zwei Arbeitsgängen durch Rollen mit der Lammfellrolle aufgebracht. Die Auftragsmenge betrug dabei im ersten Arbeitsgang etwa 500 g/m², im zweiten etwa 700 g/m². Nach dem ersten Arbeitsgang wurde mit feuergetrocknetem Quarzsand der Körnung 0,75/1,2 abgestreut, der zweite Arbeitsgang erfolgte nach 24 Stunden Wartezeit und Abschütteln überschüssigen Abstreusandes.

Tab. 6–2: Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses einer rückseitigen Durchfeuchtung

Betonart	Zementart	Zementgehalt	w/z-Wert	Sieblinie
		kg/m ²	-	
C 20/25	CEM I 32,5 R	322	0,60	B 16
C 30/37	CEM III/A 32,5 N-LH/NA	325	0,55	

Zur rückseitigen Durchfeuchtung der Betonkörper erfolgte ab zwei Wochen vor der Applikation bzw. unmittelbar nach der Applikation der Beschichtungen eine Lagerung im Fußbad. Dabei standen die 7 cm hohen Betonplatten rund 6 cm tief im Wasser. Die Beschichtung wurde somit nicht im Wasser gelagert. Der allseitige Zutritt des Wassers zum Beton wurde über Abstandhalter gewährleistet.

Nach 56-tägiger, 1-jähriger, 2-jähriger und 10-jähriger Lagerung bei ständiger, rückseitiger Feuchtebelastung wurden Haftzugversuche an der Epoxidharzversiegelung bzw. den fünf Hydrophobierungs/Epoxidharzkombinationen durchgeführt. Einige Betonplatten hatten zudem Multiringelektroden zur Erfassung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone unter der Beschichtung. Alle Versuche wurden sowohl bei 8 °C / 90 % relativer Luftfeuchte als auch bei 23 °C / 50 % relativer Luftfeuchte durchgeführt. Tab. 6–3 verdeutlicht den Parameterplan. Die Untersuchungen nach 10 Jahren erfolg-

ten in 2005.

Tab. 6–3: Parameterplan

Faktoren	Varianten					
Beton	C 20/25 mit CEM I			C 30/37 mit CEM III		
Klima	8 °C / 90 % relative Luftfeuchte			23 °C / 50 % relative Luftfeuchte		
Vorlagerung	Klima			Rückseitig durchfeuchtet		
Hydrophobierung	keine	1	2	3	4	5
Wartezeit	7 d					
Versiegelung	EPI			EP II		
Lagerung	Rückseitig durchfeuchtet (Fußbad)					
Lagerungsdauer	56 d	1 a		2 a		10 a
Prüfungen	Haftzugfestigkeiten			Feuchtemessung mit Multiring-Elektroden		

FEUCHTEVERTEILUNG IN DEN PROBEKÖRPERN

Die tiefenabhängige Messung der Feuchteverteilung erfolgte während der 10-jährigen rückseitigen Wasserlagerung mittels Multiring-Elektroden. Das Prinzip der Multiring-Elektroden ist in Abschnitt 5.2.3, Bild 5–7 erläutert. In diesem Fall hatten die Multiring-Elektroden jedoch nur vier Messstellen über eine Tiefe von rund 20 mm.

Die Messungen mit den Multiring-Elektroden während der Vorlagerung zeigen, dass die Elektrolytwiderstände in der Betonrandzone aller wassergelagerten „CEM III“-Probekörper zum Zeitpunkt der Materialapplikation deutlich höher lagen als bei den „CEM I“-Probekörpern. Optisch wirkten die „CEM I“-Probekörper ebenfalls deutlich feuchter als die „CEM III“-Probekörper. Dieser Eindruck wird auch durch die unterschiedliche Aufnahme an Hydrophobierungsstoff bei der Applikation bekräftigt: Die „CEM III“-Probekörper nahmen im Mittel mehr als die gleich behandelten „CEM I“-Proben auf /*Sas97*/.

ERSCHEINUNGSBILD

Während der 10-jährigen Lagerung der beschichteten Platten erfolgte eine regelmäßige Überprüfung des Erscheinungsbildes. Die zuvor an Trogbauwerken festgestellten Ablösungen und Blasenbildungen konnten jedoch an keiner der Proben beobachtet werden.

ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER HAFTZUGFESTIGKEITEN

Die Ermittlung der Haftzugfestigkeiten erfolgte entsprechend Bild 3–17 mit einer Laststeigerungsrate von 100 N/s. In den nachfolgenden Diagrammen sind einerseits Haftzugfestigkeiten mit Angabe der Standardabweichung und andererseits das aufgetretene Versagensbild, Adhäsionsversagen zwischen Beton und Epoxidharz oder Kohäsionsversagen im Beton dargestellt. Je Platte wurden 4 Haftzugprüfungen durchgeführt, lediglich bei den 10-jahres Werten standen nur 3 Messstellen pro Probekörper zur Verfügung.

Bild 6–2 zeigt die gemittelten Haftzugfestigkeiten die an den mit Epoxidharz I beschichteten Probekörpern ermittelt wurden (Materialkombination A). Für den Beton C 20/25 ist eine Zunahme des Versagens in der Adhäsionsebene Beton/Epoxidharz mit zunehmender Lagerungsdauer für die Va-

riante nasser Betonuntergrund zu erkennen. Überwiegt das Versagen in der Adhäsionsebene sinken tendenziell auch die Haftzugfestigkeiten. Bei den Prüfkörpern mit Beton C 30/37 ist dieser Zusammenhang nicht zu erkennen. Hier überwiegen die Brüche im Beton C 30/37 bei Haftzugfestigkeiten oberhalb von 2 N/mm². Unter Berücksichtigung der Streubreite der Haftzugfestigkeiten verdeutlicht Bild 6–2 jedoch, dass die Haftzugfestigkeiten des auf nassem Beton applizierten Epoxidharzes mit den auf trockenen Beton applizierten auf vergleichbarem Niveau liegen.

Bild 6–3 verdeutlicht, dass eine Hydrophobierung des nassen Betons vor der Applikation eines Epoxidharzes nicht zur Erhöhung der Haftzugfestigkeiten beiträgt, weder nach 1-jähriger noch nach 10-jähriger Fussbadlagerung. Eine Hydrophobierung kann im Fall B und E nach einer 10-jährigen Fussbadlagerung bei 8 °C sogar zu einer Verringerung der Haftzugfestigkeiten führen. Auch in diesem Bild ist eine Zunahme des Adhäsionsversagens mit zunehmender Lagerungsdauer zu erkennen.

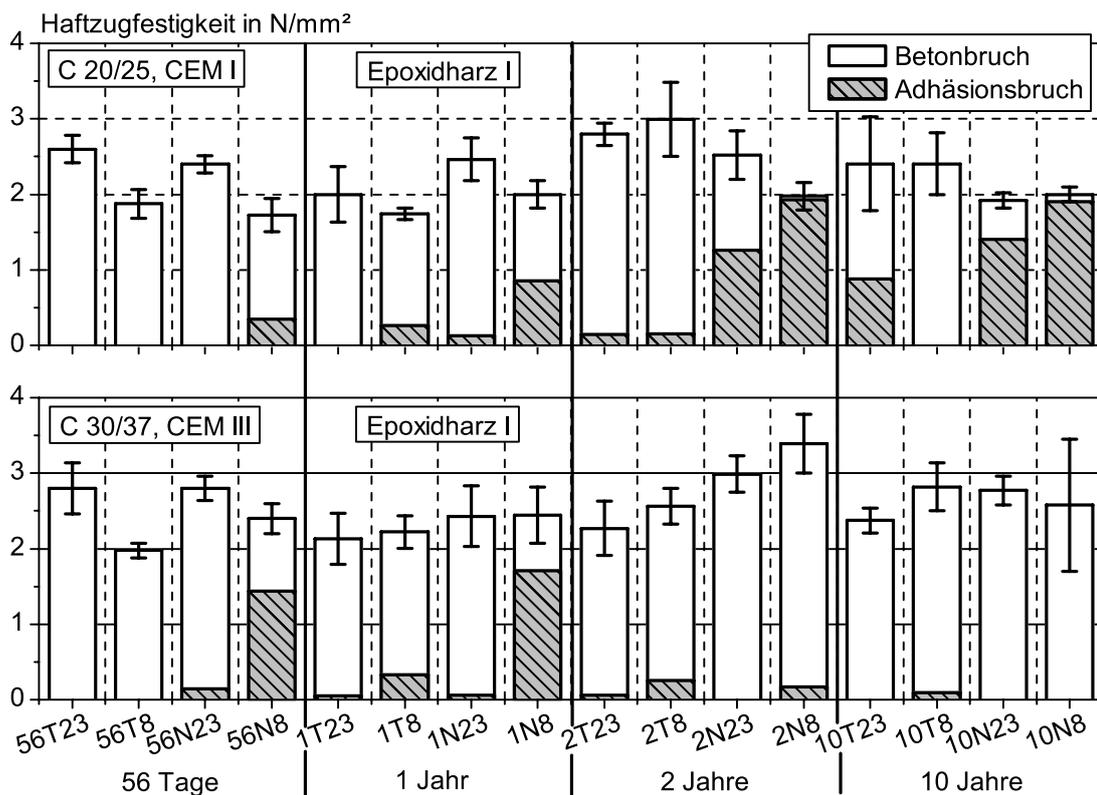


Bild 6–2: Haftzugfestigkeiten mit Standardabweichung der mit EP I versiegelten Betonplatten nach 56 d, 1 a, 2 a und 10 a Fussbadlagerung (T: auf trockenem Beton, N: auf nassem Beton appliziert, 8: Lagerung bei 8 °C / 90 % r. F., 23: Lagerung bei 23 °C und 50 % r. F.)

Zum umfassenderen Vergleich der Materialkombinationen A bis F ist im Bild 6–4, links, der Anteil am Adhäsionsversagen, gemittelt über alle Konditionierungs- und Untergrundvarianten, dargestellt. Auch in dieser Darstellung ist für die Materialkombinationen A, B, D und F eine Zunahme des Adhäsionsversagens infolge einer längeren Fussbadlagerung zu erkennen. Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Hydrophobierung nur im Fall C durchweg eine Verringerung des Versagens in der Verbundebene Beton/Epoxidharz ermöglicht. Bei den Kombinationen C und F wurde die gleiche Hydrophobierung eingesetzt und das Epoxidharz variiert. Demnach scheint das Epoxidharz II nach 10-jähriger Fussbadlagerung eher zum Adhäsionsversagen zu tendieren als Epoxidharz I. Die Hydrophobierungen E und B verschlechtern die Adhäsionseigenschaften des Epoxidharzes I. Bei E handelt es sich um eine acrylathaltige Siloxanhydrophobierung und bei B um eine 100 %ige Silan/Siloxanmischung. Die Vermutung liegt nahe, dass die in den Systemen B und E in höherem Maß enthaltenen filmbildenden Stoffe

Siloxan und Acrylat eher eine gewisse Trennschicht zwischen Epoxidharz und Beton bilden können.

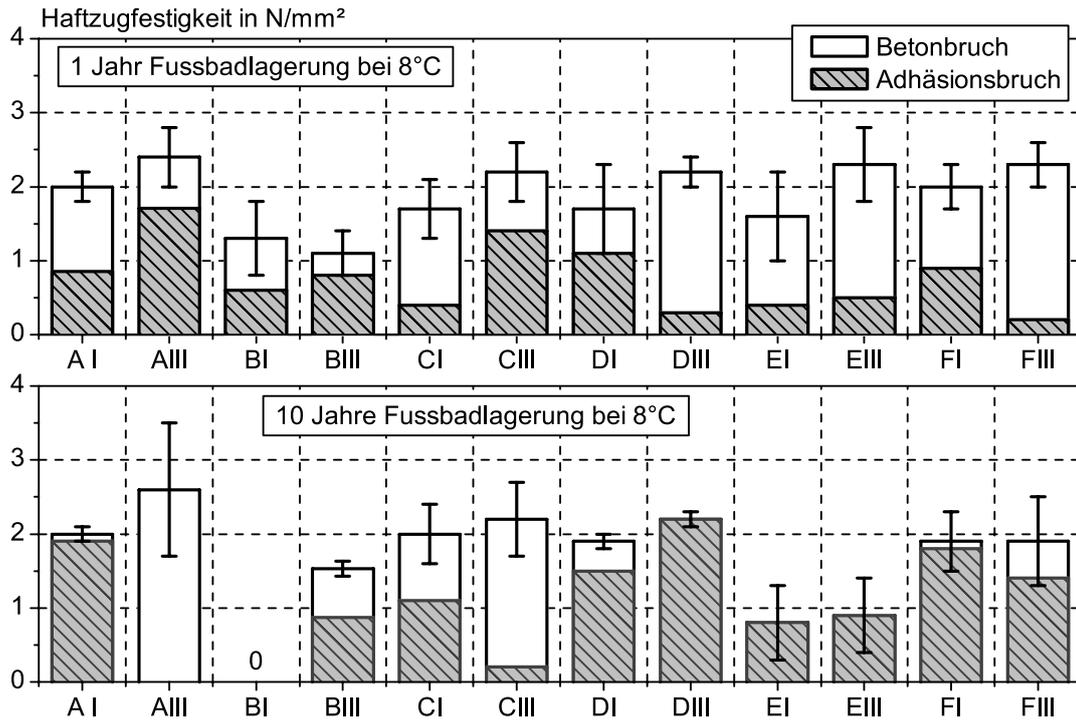


Bild 6-3: Haftzugfestigkeiten mit Standardabweichung der unterschiedlichen Materialkombinationen nach 1 Jahr und 10 Jahren Fussbadlagerung bei 8 °C / 90 % r. F.. Applikation erfolgte auf nassen Beton (I: C 20/25, CEM I, III: C 30/37, CEM III)

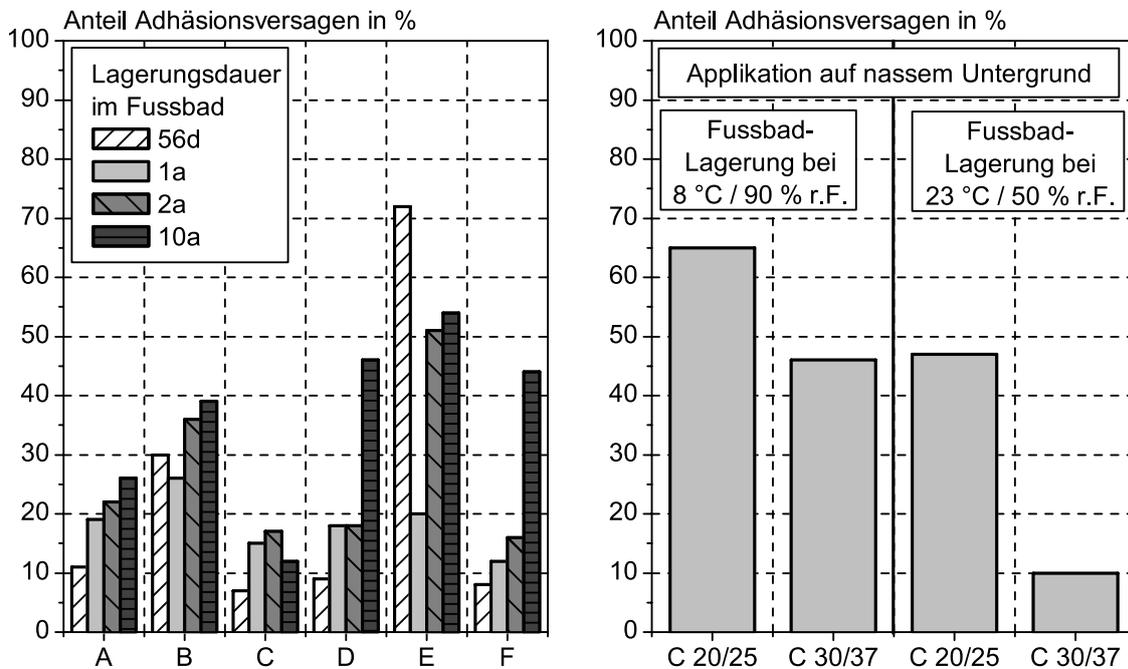


Bild 6-4: Anteile des Adhäsionsversagens in %, links: Mittelwerte über alle Lagerungskombinationen und Betone zu den vier Prüfzeitpunkten aufgeschlüsselt nach den Applikationsmaterialien, rechts: Mittelwerte über alle nass vorgelagerten Proben aufgeschlüsselt nach Temperatur und Beton

Bild 6–4, rechts, zeigt einen Vergleich der Betone und der Lagerungstemperaturen. Hierzu wurde der Anteil am Adhäsionsversagen, gemittelt über alle Materialkombinationen, aufgetragen auf nassem Beton, und Lagerungsdauern, dargestellt. Die bei 8 °C applizierten und gelagerten Proben versagen häufiger in der Verbundebene Beton/Epoxidharz als die bei 23 °C hergestellten sowie gelagerten Proben. Weiterhin weist der Beton C 30/37 geringere Anteile am Adhäsionsversagen auf als der Beton C 20/25. Aufgrund des vermutlich geringeren Wassergehaltes in der Betonrandzone beim C 30/37 ist die Haftung des auf nassem Beton applizierten Epoxidharzes demnach besser.

6.2.3 EINFLUSS VON IN RISSEN ANSTEHENDEM WASSERDRUCK

Im Rahmen einer Materialprüfung wurde an drei potentiellen Innenabdichtungen für „Weiße Wannen“ untersucht, wie lange die Abdichtung bei einer Rissbreite von 1 mm einem rückseitig anstehendem hydrostatischen Wasserdruck über zwei Meter Wassersäule standhält. Die drei Innenabdichtungen basieren auf einer Brückenabdichtung nach ZTV-ING, Bild 2–22. Sie weisen eine Epoxidharzgrundierung, eine Quarzsandabstreuung 0,5/1,2 mm im Überschuss, eine zweite Epoxidharzschicht und abschließend eine Bitumen-Schweißbahn auf. Es wurden Betonplatten mit 60 cm Breite, 60 cm Länge und 6 cm Dicke mit einer zentrisch angeordneten Sollrissstelle hergestellt. Nach Auftrag der Abdichtungen wurden an den Probekörpern Rissbreiten von 1 mm anhand eines einbetonierten Bewehrungskorbs mit Gewindeanschlüssen eingestellt. Nach Verdämmen der Risse und Aufbringen von Klebepackern erfolgte die Beaufschlagung des Risses mit einem hydrostatischen Wasserdruck von 2 m Wassersäule. Somit wirkte der Wasserdruck von der Betonseite auf die Abdichtung. Bild 6–5 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

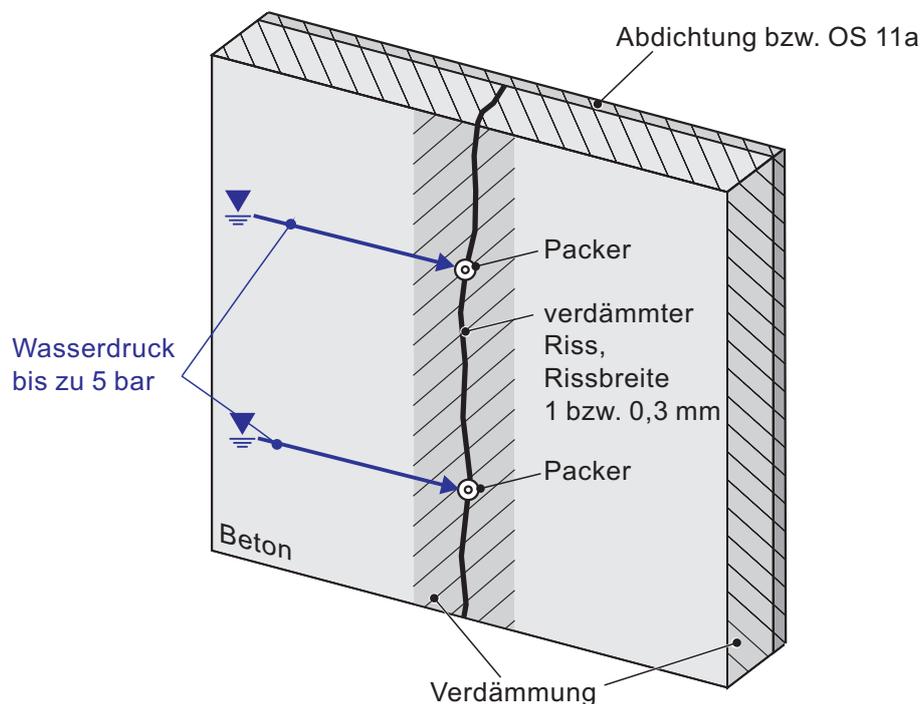


Bild 6–5: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses von in Rissen anstehendem Wasserdruck

Tab. 6–4 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen. Die drei Abdichtungen versagten innerhalb von 12 bis 84 Stunden. Das Versagen resultierte aus einer sukzessiven Ablösung der Bitumen-Schweißbahn vom Untergrund, ausgehend vom Rissbereich.

Als Alternative wurden zusätzlich zwei OS 11a Systeme entsprechend Bild 2–21 untersucht. Nach Auftrag der OS 11a Systeme wurde der Riss jedoch nur 0,3 mm geöffnet. Tab. 6–4 zeigt, dass die OS 11a Systeme unter Einwirkung eines hydrostatischen Wasserdrucks mit einer Wassersäule bis zu 50 m auch nach 1680 Stunden nicht versagten. Kann sichergestellt werden, dass die Rissbreite von Rissen, die nach Applikation der Abdichtung entstehen, unterhalb von 0,3 mm bleibt, so stehen OS 11a-Systeme zur Verfügung die einem temporären rückseitig anstehenden Wasserdruck von bis zu 5 bar standhalten.

Tab. 6–4: Standzeiten der Abdichtungen in Abhängigkeit der Rissbreite und dem Wasserdruck

Einstellungen	Einheit	Abdichtung 1	Abdichtung 2	Abdichtung 3	OS 11a -1	OS 11a -2
Hydrostatischer Wasserdruck	m	2	2	2	50	50
Rissbreite	mm	1,0	1,0	1,0	0,3	0,3
Standzeit bis Versagen	h	84	36	12	> 1680	> 1680

6.3 ZUSTANDSUNTERSUCHUNGEN AN PARKHAUSBESCHICHTUNGEN

6.3.1 ALLGEMEINES

Parkbauten unterliegen entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 2.2.2 hohen Beanspruchungen. Von Oberflächenschutzsystemen für Parkbauten werden einerseits im gesamten Gebrauchstemperaturbereich elastische Eigenschaften zur Rissüberbrückung gefordert, andererseits muss jedoch eine ausreichende Verschleißfestigkeit vorhanden sein. Während OS 8-Systeme im Allgemeinen einen hohen Verschleißwiderstand aufweisen und nicht rissüberbrückend sind, weisen OS 11-Systeme ihren Vorteil in der Rissüberbrückungsfähigkeit und ihre Schwäche im Verschleißwiderstand auf. OS 13-Systeme können mit einer geringeren Rissüberbrückungsfähigkeit als OS 11-Systeme in ihrer Leistungsfähigkeit dazwischen eingeordnet werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens F 982 /Rau04/ wurden 10 Parkbauten (1 unbeschichtetes und 9 beschichtete) untersucht. Folgende Bedingungen wurden für die Auswahl der Parkbauten festgelegt:

- Parkdeckoberflächen in Ortbeton
- Keine vorgespannten Konstruktionen
- Alter mindestens 10 Jahre
- Zeitnahes (< 1 Jahr nach dem Betonieren) Aufbringen der Beschichtung
- Polymerbeschichtung mit Epoxidharzgrundierung, soweit möglich nach RL-SIB /DAf01/

Die Suche nach entsprechenden Parkhäusern hat ergeben, dass die Ausführung nach RL-SIB, obwohl in der ersten Fassung bereits 1990 erschienen, vor nunmehr vor 17 Jahren nicht üblich war. Die untersuchten Beschichtungen entsprechen somit nur bedingt der RL-SIB.

6.3.2 ERSCHEINUNGSBILDER

Die Erscheinungsbilder der untersuchten Objekte sind in Tab. 6–5 zusammengefasst. Die Übersicht ist noch um die Fallbeispiele von Jung et al /Jun05/ ergänzt. Die von /Jun05/ betrachteten Rampen sind zwar nur zwischen anderthalb und sechs Jahren in Betrieb gewesen, sie wurden jedoch im Wesentlichen mit OS-Systemen nach RL-SIB beschichtet.

Tab. 6–5: Übersicht zu den Erscheinungsbildern der untersuchten Parkbauten

Objekt	Alter [a]	OS-System	Erscheinungsbild
2a	15	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: keine hwO: EP mit QS, S_d : 1,6 mm Deckversiegelung: keine	Keine starken Verschleißerscheinungen, keine Abplatzungen, Risse (teilweise mit EP verschlossen & erneut gerissen), Rissbreiten 0,3 bis 0,6 mm
2b	15	Grundlage: OS 11b Grundierung: EP mit QS, S_d : 1 mm hwO: PUR mit QS, S_d : 2,3 mm Deckversiegelung: keine	Streuung der $S_d > 100$ %, kraqueleeartiges Rissbild, Ablösungen der hwO im Bereich Arbeitsfugen OS-System (Bild 6–6)
3	25	Kein System nach /DAf01/ Acrylat, S_d : n.b.	Bereichsweise deutlicher Verschleiß bis zur vollständigen abgenutzt, Raumfugen, mit Gussasphalt und Fugenprofile instandgesetzt, sind undicht (gerissen bzw. unvollständig)
4	10	Grundlage: OS 8 Grundierung: EP mit QS, S_d : 0,3 mm hwO: EP mit QS, S_d : 0,7 mm, Deckversiegelung: EP 0,5 mm	Großflächig kein Verschleiß, aber in Teilbereichen Abplatzungen aufgrund lokal fehlender Abstreueung (Bild 6–7, links), Schwindrisse des Estrichs haben sich im OS-System fortgesetzt, unzureichende Entwässerung -> Feuchteschäden an aufgehenden Wänden mit Betonabplatzungen
5	16	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: EP mit QS, S_d : 0,3 mm hwO: EP mit QS, S_d : 1,5 mm Deckversiegelung: EP	Trennrisse, die sich im OS-System fortsetzen, Rissbreiten: 0,2-0,3 mm, mit EP behandelte Risse sind erneut gerissen, ungleichmäßiger Verschleiß der Deckversiegelung
6	22	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: keine hwO: EP mit QS, S_d : 1,1 mm (Oberdeck) & 0,5 mm (Unterdeck) Deckversiegelung: EP, S_d : 0,3 bzw. 0,4 mm	Nur geringfügiger Verschleiß, auch im Bereich der Rampen! Lokale Fehlstellen in Fahrstrassen wurden instandgesetzt, im Bereich der Betonierfugen Trennrisse mit Rissbreiten bis 0,3 mm – dort auch Abplatzungen des OS-Systems, Biegerisse mit Rissbreiten von 0,2 bis 0,3 mm oberhalb der Unterzüge, unzureichende Entwässerung
7a	10	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: keine hwO: EP mit QS, S_d : 1,5 mm Deckversiegelung: EP, S_d : 0,9 mm	Trennrisse im Bereich der Arbeitsfugen mit Rissbreiten von 0,2-0,4 mm bzw. > 1 mm, Trennrisse zum Teil mit EP verschlossen, dort keine erneute Rissbildung
7b	10	Grundierung: keine hwO: PF, S_d : 0,18 mm Deckversiegelung: keine	Schäden, Abplatzungen in der Beschichtung, vermutlich aufgrund Feuchte und Tausalzen (Bild 6–7, rechts)
8	19	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: keine hwO: EP mit aufliegendem QS, S_d : 1 mm Deckversiegelung: keine	Deutlicher Verschleiß

Objekt	Alter [a]	OS-System	Erscheinungsbild
9	15	QS mit EP verklebt, S_d : 1 mm	Unbehandelte Trennrisse, starker Verschleiß
10	13	In Anlehnung an OS 8 Grundierung: keine hwO: EP mit QS, S_d : 2,8 mm	Rampen: keine Rissbildung, nur punktueller Verschleiß durch Herauslösen des Abstreukorns (sonstige Bereiche hydrophobiert)
/Jun05/ 1	2	Grundlage: OS 13 Grundierung: EP mit QS hwO: EP-PU mit QS Deckversiegelung: PU S_d komplett: 3,4 mm	In der Fläche keine Risse und kein Verschleiß
/Jun05/ 2	6	Grundlage: OS 8 Grundierung: EP mit QS hwO: EP mit QS Deckversiegelung: EP S_d komplett: 2 mm	Trennrisse im Abstand von 1,5 bis 2,0 m im Beton und Beschichtung, unterseitig Durchfeuchtet & Rostfahnen im Rissbereich
/Jun05/ 3	4	Grundlage: OS 8 EP-Grundierung, als Verlaufmörtel gefüllt mit QS, abgestreut mit Durop 1-2 mm Deckversiegelung: keine S_d komplett: 2,5 mm	Risse in der Beschichtung über den Stoßkanten der Filigranplatten, Ablösen der Beschichtung seitlich des Rissbereichs in der Fahrspur
/Jun05/ 4	1,5	Grundlage: OS 8 Grundierung: EP mit QS hwO: keine, Deckversiegelung: EP, S_d komplett: 1,5 mm	In der Fläche keine Risse und kein Verschleiß
/Jun05/ 5	3	Grundlage: OS 8 Grundierung: EP mit QS hwO: EP mit Chromerzschlacke Deckversiegelung: EP S_d komplett: 2,5 mm	In der Fläche keine Risse und kein Verschleiß
/Jun05/ 6	2,5	Grundlage: OS 11b Grundierung: EP mit QS hwO: PU gefüllt & abgestreut mit QS Deckversiegelung: EP, S_d komplett: 3 mm	Im Bereich der Fahrspuren keine Risse und kein Verschleiß, Schrammborde haben Querrisse mit Rissbreiten 0,05-0,2 mm
/Jun05/ 7a	2,5	Grundlage: OS 11b Grundierung: EP mit QS hwO: PU mit QS Deckversiegelung: EP	Freibewittert: Risse, Rissbreite bis 0,3 mm, kein Verschleiß in der Fahrspur
/Jun05/ 7b	2,5	Grundlage: OS 8 Grundierung: EP mit QS hwO: keine Deckversiegelung: EP S_d komplett: 1,8 mm	Keine Risse, kein Verschleiß
/Jun05/ 8	2	Grundlage: OS 11b Grundierung: EP mit QS hwO: PU mit QS Deckversiegelung: PU	Freibewittert: Risse, Rissbreite bis 0,3 mm
/Jun05/ 9	2,5	Grundlage: OS 13 Grundierung: EP mit QS hwO: EP-PU mit QS Versiegelung: PU mit QS S_d komplett: 3,0 mm	Keine Riss erkennbar, Verschleiß bzw. Herauslösen von Abstreukorn nicht erkennbar obwohl Quarzsand in letzter PU-Schicht

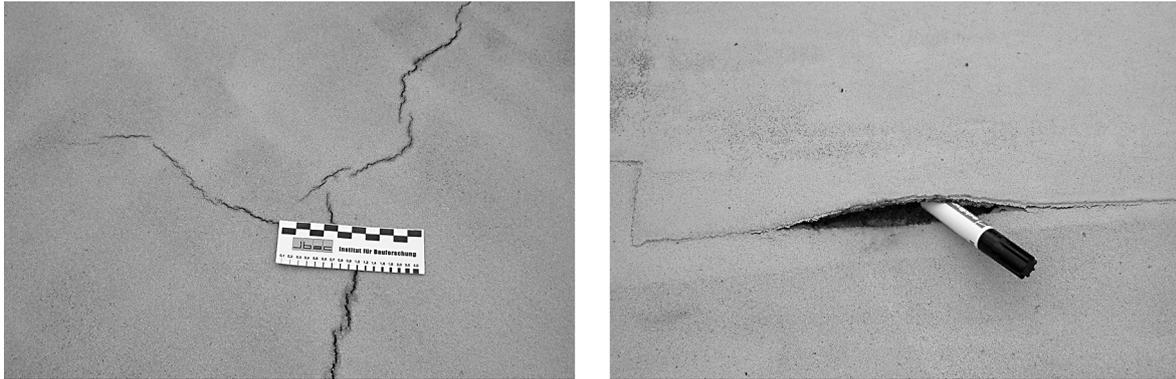
Erläuterungen:

EP: Epoxidharz, PUR: Polyurethan, PF: Phenolharz, QS: Quarzsand

EP-PU: Epoxidharz-Polyurethan-Kombination,

S_d : Schichtdicken S_d ; n.b. bedeutet Schichtdicken $\leq 50 \mu\text{m}$

Bild 6–6 zeigt die Rissbildungen und Ablösungen des OS 11a –Systems im Objekt 2. Die im Objekt 4 lokal aufgetretenen Abplatzungen des OS 8 Systems sind in Bild 6–7, links dargestellt. Anhand der Schäden (Bild 6–7, rechts) kann geschlussfolgert werden, dass Acrylatdispersionen und Phenolharze für befahrbare Flächen ungeeignet sind. Diese sind in den Regelwerken auch nicht für befahrbare OS-Systeme vorgesehen.



6

Bild 6–6: Risse und Ablösungen der OS 11a Beschichtung auf dem Freideck von Objekt 2 /Rau04/



Bild 6–7: Links: Abplatzungen im OS 8-System von Objekt 4. Rechts: Schäden in der Phenolharzbeschichtung /Rau04/

Bild 6–8 zeigt einen Vergleich der Beschichtungs-Aufbauten in den Objekten 6, 8 und 9. Während Objekt 6 auch nach 22-jähriger Benutzung nur geringfügig Verschleißspuren aufweist, weisen die Beschichtungen in den Objekten 8 und 9 starken Verschleiß auf. Demnach erhöht das vollständige Einbetten des Quarzsandes im Epoxidharz der hwO und eine darüber aufgebrachte Epoxidharzversiegelung den Verschleißwiderstand.

Insgesamt wurden 14 Objekte mit einer Epoxidharzbeschichtung untersucht. Dabei wurden in vier Fällen weder Risse noch nennenswerter Verschleiß festgestellt. Bei zwei Objekten trat deutlicher Verschleiß auf. Allerdings entsprach die Epoxidharzbeschichtung hier auch nicht dem heute geforderten OS 8-System. Ansonsten überwogen die Fälle in denen der Verschleiß ggf. lokal begrenzt auftrat, aber immer Risse im OS-System festgestellt wurden. An den Beschichtungen mit Polyurethan wurde jedoch auch kein nennenswerter Verschleiß benannt, sondern ebenfalls die Bildung von Rissen und

im Objekt 2b Ablösungen. Die zwei betrachteten OS 13-Systeme weisen keine Schäden auf. Allerdings waren die Systeme zum Zeitpunkt der Untersuchung auch erst 2 bzw. 2,5 Jahre in Benutzung. Hier wären weitere Untersuchungszeitpunkte hilfreich.

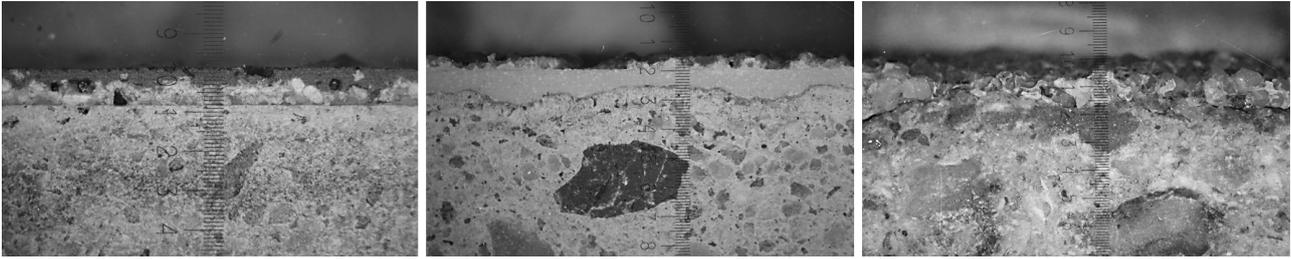


Bild 6–8: Aufbau der Beschichtungen im Objekt 6 (links), Objekt 8 (mitte) und Objekt 9 (rechts) (Mikroskopaufnahme, 1 Skalenteil entspricht 0,1 mm) /Rau04/

6.3.3 CO₂ EINDRINGWIDERSTAND

Zur Beurteilung der Karbonatisierungstiefe wurden Bohrkerne entnommen, gespalten und mit Phenolphthalein besprüht. Die Karbonatisierungstiefe wurde sowohl direkt unterhalb der Beschichtung als auch an den Rissflanken der Trennrisse bestimmt.

Die maximalen Karbonatisierungstiefen unmittelbar unterhalb der Beschichtungen betrugen 3 bis 5 mm. Überwiegend konnte praktisch keine Karbonatisierungstiefe bestimmt werden. Hinsichtlich des Kohlenstoffdioxideindringens sind die untersuchten Beschichtungen somit als nahezu CO₂-undurchlässig einzustufen. Im Bereich der Trennrisse wurde hingegen an den Rissflanken ein deutlicher Einfluss der Karbonatisierung gemessen.

6.3.4 CHLORIDEINDRINGEN

Zur Ermittlung von Chloridtiefenprofilen in den Konstruktionsbetonen unterhalb der Oberflächenschutzsystemen erfolgte die Entnahme von Bohrmehlproben. Das Bohrmehl wird beim trockenen Bohren durch einen Hohlbohrer abgesaugt, gesammelt und analysiert. Die Entnahme erfolgte in den Tiefenlagen 0-7 mm, 7-14 mm, 14-21 mm, 21-30 mm sowie ggf. 40-50 mm. Der Gesamtchloridgehalt wurde durch Säureaufschluss und anschließender Potentiometrischer Titration bestimmt /DAf89/ und mittels Multiplizieren mit dem Faktor 7 vereinfacht auf die Zementmasse umgerechnet.

Bild 6–9 zeigt die an den zehn untersuchten Parkbauten ermittelten Chloridprofile. Die Beschreibung der Objekte befindet sich in Tab. 6–5. Die Chloridentnahme erfolgte jeweils in ungerissenen Bereichen der Oberflächenschutzsysteme. Objekt 1, Alter 30 Jahre, hatte kein Oberflächenschutzsystem, hier sind die Chloridkonzentrationen demnach deutlich höher als bei den beschichteten Objekten. Objekt 3 weist bis in einer Tiefe von bis zu 21 mm ebenfalls höhere Chloridgehalte auf. Die bereits deutlich verschlissene Acrylatbeschichtung ist demnach nachweislich weniger effektiv gegenüber Chlorideindringen als eine OS 8 bzw. OS 11b Beschichtung (O2a und O2b). Die Beschichtungen, die auf Epoxidharz basieren, weisen überwiegend Chloridgehalte unterhalb von 0,5 M.-% bzw. auf Zement auf.

Ausnahmen sind jedoch die Objekte 6, 8 und 9. Objekt 6 weist nach 22-jähriger Nutzung nur geringen Verschleiß auf, allerdings ist die Entwässerung so unzureichend, dass in der Winterzeit von einer kontinuierlichen Beaufschlagung mit Chloridlösung ausgegangen werden kann. Zudem beträgt die Schichtdicke der Epoxidharzbeschichtung zum Teil nur 0,9 mm. Diese Faktoren können die ver-

gleichsweise hohen Chloridgehalte bis in Tiefen von 50 mm verursacht haben. Bei Objekt 8 ist nach 19-jähriger Nutzung eine Erhöhung der Chloridgehalte an der Betonoberfläche festzustellen. Objekt 9 weist bis in einer Tiefe von 21 mm Chloridgehalte oberhalb von 0,5 M.-% bzw. auf Zement auf. Beide Objekte (O8 und O9) weisen einen hohen Verschleiß auf und die Schichtdicke beträgt lediglich 1 mm. Die Vergleichsweise höheren Chloridgehalte bei Objekt 9 nach 15 Jahren können auch durch den Aufbau der Epoxidharzbeschichtung begründet sein: Hier wurde lediglich das Quarzkorn mit Epoxidharz verklebt, eine durchgehende und geschlossene Schicht Epoxidharz liegt ggf. nicht vor.

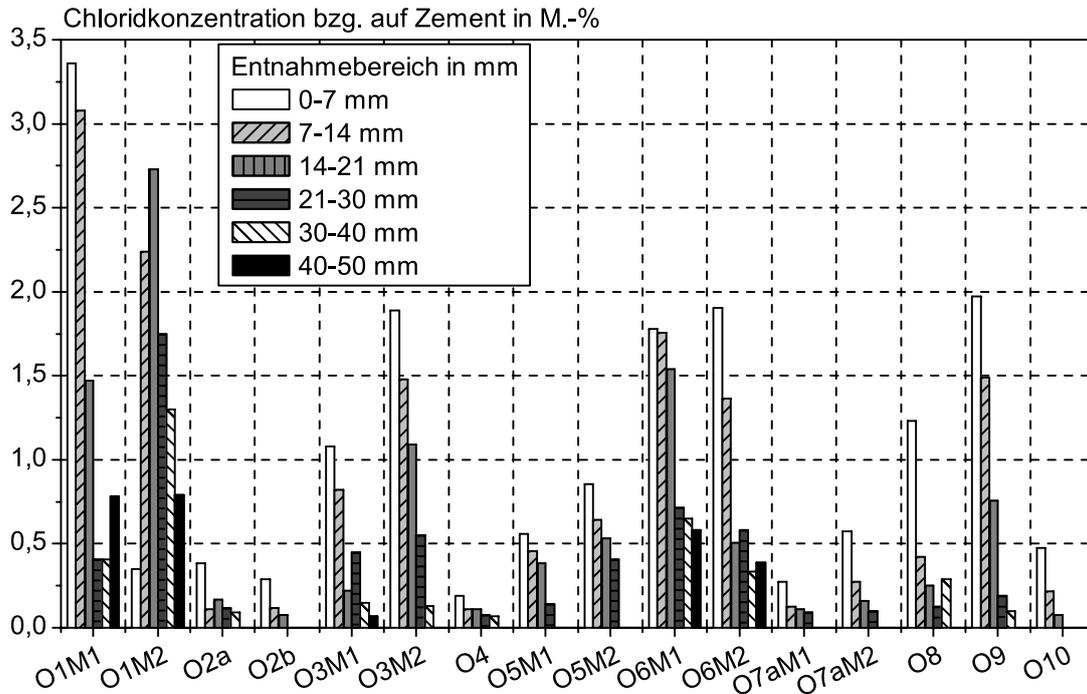


Bild 6–9: Zusammenstellung der an den Objekten (O1 bis O10) ermittelten Chloridprofile. Zum Teil Doppelbestimmung (M1 und M2)

Anhand der ermittelten Chloridtiefenprofile wurden Chloriddiffusionskoeffizienten nach Gleichung 6–1 berechnet und mit Chloridmigrationskoeffizienten der jeweiligen Konstruktionsbetone verglichen. Zur Bestimmung der Chloridmigrationskoeffizienten der Konstruktionsbetone der Objekte 1 bis 10 wurden jeweils Bohrkerne entnommen und diese im RCM-Test (Rapid-Chlorid-Migration-Test /Geh00/) untersucht. In Gleichung 6–1 ist $C(x,t)$ der Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x zum Zeitpunkt t in Massenprozent bzw. auf den Zementgehalt, C_s die Chloridkonzentration an der Betonoberfläche zum Zeitpunkt t in Massenprozent bzw. auf den Zementgehalt, x die Tiefe in Meter, t die Auslagerungszeit in Sekunden, erf eine Fehlerfunktion und $D_{\text{Eff., C, B}}$ der effektive Chloriddiffusionskoeffizient von Beton mit Beschichtung zum Zeitpunkt t in m^2/s .

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff., C, B}} \cdot t}} \right]$$

Gleichung 6–1

Exemplarisch zeigt Tab. 6–6 einen Vergleich der Chloridmigrationskoeffizienten der Bauwerksbetone mit den ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten. Aufgrund zahlreicher Annahmen und Randbedingungen, wie Festlegung der Chloridkonzentration an der Betonoberfläche, Abhängigkeit des Chloridmigrationskoeffizienten vom Betonalter, Betonexposition, Wassergehalt, sind die in Tab. 6–6

dargestellten Koeffizienten kritisch zu betrachten. Allerdings verdeutlicht Tab. 6–6, dass durch Oberflächenschutzsysteme auf Basis von Epoxidharz bzw. Polyurethan das Eindringen von Chloriden während einer rund 15-jährigen Nutzungsdauer deutlich reduziert wird.

Tab. 6–6: Vergleich der Diffusionskoeffizienten aus Chloridtiefenprofilen $D_{\text{Eff, C, B}}$ mit Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} der Bauwerksbetone

Koeffizienten	Einheit	Objekt 2a	Objekt 2b	Objekt 5	Objekt 7	Objekt 10
$D_{\text{eff, C, B}}$	$\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^{-12}$	0,6	0,2	1,7	0,4	0,4
D_{RCM}		8,8	8,8	16,5	16	28

6.3.5 KORROSIONSZUSTAND DER BEWEHRUNG IN RISSEN

Bei Parkbauten sind Risse in Stahlbetonkonstruktionen problematisch, wenn korrosionsauslösende Stoffe wie Chloride über den Riss zur Stahlbewehrung vordringen und es bei ausreichender Betondurchfeuchtung zur Stahlkorrosion kommt. Ist dies der Fall, so erfolgt im Rissbereich die anodische Teilreaktion mit der Eisenauflösung, während in den ungerissenen Nachbarbereichen die kathodische Teilreaktion abläuft. Da der Transport von Chloriden und Wasser in Trennrissen im Vergleich zu Biegerissen deutlich schneller erfolgt, ist die Korrosionsgeschwindigkeit in Trennrissen im Allgemeinen höher.

Bei einem flächig applizierten Oberflächenschutzsystem kann der elektrolytische Widerstand des Betons infolge zunehmender Austrocknung ansteigen. Durch die daraus resultierende Einschränkung des elektrolytischen Teilprozesses der Korrosion verkleinert sich die Kathodenfläche A_K rund um den Rissbereich stetig, wodurch gleichzeitig der anodische Teilprozess gehemmt wird. Die Abtragsrate an der Anode V_{Korr} in mm/a ist dabei entsprechend Gleichung 6–2 direkt proportional zur Kathodenfläche. Die Proportionalität wird durch eine systemabhängige Konstante K sowie der Anodenfläche A_A beeinflusst.

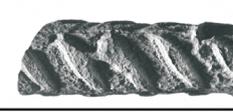
$$V_{\text{Korr}} = K \cdot \frac{A_K}{A_A}$$

Gleichung 6–2

Zur Betrachtung dieses Einflusses von Oberflächenschutzsystemen auf die Stahlkorrosion wurden bei den 10 Parkbauten sowohl in Biege- als auch Trennrissen Bewehrungsstähle ausgebaut und für die Beurteilung der Art der Korrosionserscheinungen mittels der Clark'schen Lösung gebeizt. Dadurch konnten bereits kleinste Korrosionsnarben sichtbar gemacht werden. Weiterhin erfolgte direkt an der Stahloberfläche im Rissbereich die Bestimmung der Chloridkonzentration. Tab. 6–7 zeigt ausgebaute und gebeizte Bewehrungsstähle aus untersuchten Objekten mit Angabe des Bauwerksalters, Betondeckung, Rissbreite an der Oberfläche sowie Chloridkonzentration.

Die im Objekt 5 und Objekt 7 ausgebauten Stähle im Bereich von Trennrissen weisen Querschnittsverluste von über 50 % auf. Im Vergleich dazu sind die im Bereich von Biegerissen entnommenen Stähle deutlich weniger korrodiert, obwohl hier zum Teil vergleichbar hohe Chloridgehalte an der Stahloberfläche vorlagen. Demnach kann bei Biegerissen die Korrosionsgeschwindigkeit sinken, wenn infolge eines aufgetragenen Oberflächenschutzsystems der Beton austrocknet. Dies ist jedoch durch weitere Untersuchungen, insbesondere unter Berücksichtigung der lokalen Betonwassergehalte zu verifizieren.

Tab. 6-7: Darstellung ausgebauter Bewehrungsstäbe aus Biege- und Trennrissen /Rau04/

Objekt	Alter	Rissart	Rissbreite*	Betondeckung	Cl-Gehalt an der Stahloberfläche	Maximale Tiefe Korrosionsnarbe	Restquerschnittsfläche	Ansicht des gebeizten Stahls
-	Jahre	-	mm		M-%/ Zement	mm	%	-
5	16	Trennriss	0,2	40	0,5	2,75	ca. 40	
7	10	Trennriss	0,8	75	2,1	3,4	ca. 25	
3	25	Biegeriss	0,3	50	1,2	0	100	
6	22	Biegeriss	0,3	50	1,0	0	100	
8	19	Biegeriss	0,4	30	2,4	2,5	ca. 90	
9	15	Biegeriss	0,3	40	0,8	0,3	ca. 95	

6.3.6 SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN UNTERSUCHUNGEN

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass starre Epoxidharzbeschichtungen bei ausreichender Schichtdicke und mit Deckversiegelung auch nach 15 bis 22-jähriger Nutzung nur geringe Verschleißerscheinungen aufweisen. Die in der überwiegenden Anzahl der betrachteten Bauwerke aufgetretenen Risse sind jedoch lokal zu behandeln. Insbesondere Trennrisse bedingen Stahlkorrosion mit hohen Korrosionsgeschwindigkeiten. Im Bereich von Biegerissen kann hingegen die Korrosionsgeschwindigkeit bei Bauten mit Oberflächenschutzsystemen als geringer eingestuft werden. Da das Eindringen von Chloriden in den Konstruktionsbeton mit Oberflächenschutzsystemen ausreichender Schichtdicke drastisch reduziert wird, ist eine Reduktion der Expositionsklassen entsprechend Bild 6–10 gerechtfertigt.

Unter anderem basierend auf diesen Untersuchungen im Forschungsvorhaben F892 /Rau04/ werden im DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ /DBV10/ die in Bild 6–10 dargestellten Ausführungsvarianten angegeben. Oberflächenschutzsysteme sollten nach /DBV10/ erst nach weitestgehend abgeschlossener Rissbildung, d. h. so spät wie möglich aber möglichst vor dem ersten Eintrag von Chloriden appliziert werden. Eine Ergänzung der Oberflächenschutzsysteme mit lokalen Rissbandagen über einzelne Risse mit großen Rissbreitenänderungen hat sich bewährt.

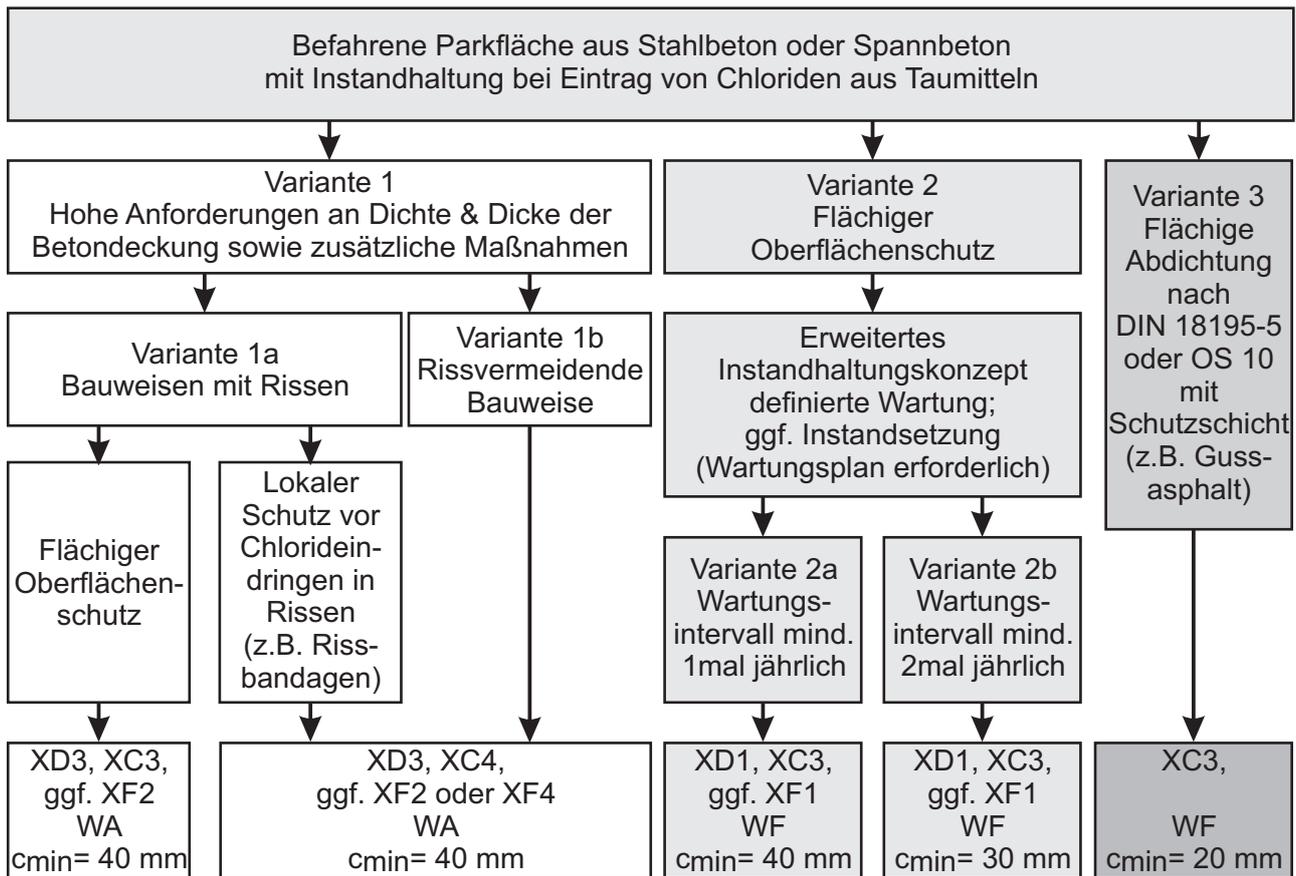


Bild 6-10: Ausführungsvarianten für Parkdecks /DBV10/

6.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mangelnde Haftung der befahrbaren Oberflächenschutzsysteme zum Untergrund ist neben dem Verschleiß und der Dichtheit/Rissbildung ein häufig diskutierter Schadensfall. Darauf basierend wurden umfangreiche, mehrjährige Untersuchungsreihen hinsichtlich der Haftzugfestigkeit von Grundierungen zum Beton durchgeführt. Als Grundierungen wurde eine Bandbreite an Epoxidharzen gewählt. Ergebnis dieser umfangreichen Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen Betonen, Betonfeuchten, Lagerungsklimaten, Epoxidharzen und Hydrophobierungen ist, dass Schäden wie Adhäsionsminderung, Adhäsionsverlust und Blasenbildung nicht festgestellt werden konnten. Eine Differenzierung in den Versuchsvarianten ist jedoch hinsichtlich der Versagensarten im Haftzugversuch möglich. Der Anteil am Adhäsionsversagen im Haftzugversuch steigt bei

- der Applikation auf nassem Beton,
- einer Fussbadlagerung bei 8 °C anstelle von 23 °C und
- einem aufgrund höherer Betonporositäten erhöhten Betonwassergehalt.

Eine Hydrophobierung des nassen Betons vor der Applikation eines Epoxidharzes bedingt keine Erhöhung der Haftzugfestigkeiten, weder nach 1-jähriger noch nach 10-jähriger Fussbadlagerung. Stattdessen kann eine Hydrophobierung den Anteil am Adhäsionsversagen sogar erhöhen, wenn im höheren Maß filmbildende Stoffe enthalten sind.

Weiterhin wurde gezeigt, dass schockartig aufgebrachte Temperaturen bis zu 700 °C, wie sie beim Aufschweißen einer Bitumenschweißbahn entstehen, die Haftzugfestigkeiten von Grundierungen zum Beton nicht signifikant beeinflussen. Diese Aussage basiert auf ein breit gefächertes Versuchsprogramm bei dem Beton, Grundierungen und Betonoberflächenvorbereitungen variiert wurden.

Die umfangreichen Untersuchungen an Parkbauten verdeutlichen ebenfalls, dass weder Haftung noch Verschleiß noch mangelnder Eindringwiderstand hauptsächliche Schadensursachen sind. Voraussetzung für diese Aussage ist allerdings die Ausführung der Oberflächenschutzsysteme gemäß Merkblatt und Richtlinie /DVB10/, /DAf01/. Denn verringerte Schichtdicken und/oder mangelhafte Abstreuerung mit Quarzsand bedingen Undichtigkeiten im Oberflächenschutzsystem und damit ein Eindringen von Chloriden. Die Untersuchungen bestätigen die Relevanz ausreichender Schichtdicken für die Dauerhaftigkeit befahrbarer Oberflächenschutzsysteme. Die Überprüfung der Schichtdicken kann zukünftig zerstörungsfrei am Bauwerk mit der NMR-MOUSE erfolgen.

Bei den untersuchten Parkbauten wurden häufig gerissene Oberflächenschutzsysteme festgestellt. Dies gilt sowohl für starre als auch rissüberbrückende Systeme. Die hohen Korrosionsgeschwindigkeiten des Bewehrungsstahls in Trennrissen erfordern die zeitnahe lokale Behandlung dieser Risse.

7. ANORGANISCHE OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

7.1 ALLGEMEINES

Entsprechend Bild 1-1 wurden auch neue Verfahren zum Schutz von Betonoberflächen untersucht. Diese beruhen auf anorganische Materialien, zum einen Glas und zum anderen Textilbeton. Beide Verfahren finden ihren Einsatz bei speziellen Fragestellungen, bei denen die bisher erläuterten Oberflächenschutzsysteme eine unzureichende Dauerhaftigkeit aufweisen. So wurde der in Abschnitt 7.2 erläuterte Oberflächenschutz mit Glas für Anwendungen im Abwasserbereich untersucht, während die textilbewehrten Spritzmörtel (Abschnitt 7.3.3) für die Instandsetzung alter, massiver, kaum bewehrter Betonbauwerke entwickelt wurden.

Der Oberflächenschutz mit Textilbetonen bietet über die hier insbesondere dargestellten textilbewehrten Spritzmörtel hinaus noch wesentlich mehr Anwendungspotentiale. Diese werden im Abschnitt 7.3.1 kurz, aber unter Angabe weiterführender Literatur, dargestellt. Da die Materialien des Textilbetons nicht im Abschnitt 2.4 erläutert wurden, erfolgt dies im Abschnitt 7.3.2.

7.2 OBERFLÄCHENSCHUTZ MIT GLAS

7.2.1 PROBLEMSTELLUNG

Die umweltschonende, geruchsarme Abwasserentsorgung von 82 Millionen Einwohnern in Deutschland (230 Personen/Quadratkilometer) bedingt bei einer Vielzahl von Abwasseranlagen aus Stahlbeton wachsende Stahlbetonschäden. Sinkende Wassermengen in den Anlagen führen zur Verringerung der Fließgeschwindigkeit bei gleichzeitig verstärkter Bildung von biogener Schwefelsäurekorrosion. Der Schadensmechanismus infolge biogener Schwefelsäurekorrosion ist in Abschnitt 3.2.1 erläutert.

Zur langfristigen Vermeidung von Betonschäden in neu errichteten bzw. instand gesetzten Abwasseranlagen mit pH-Werten unter 3,5 wird ein Oberflächenschutzsystem benötigt, welches dauerhaft einen Angriff der Betonoberfläche durch Schwefelsäure verhindert. Derartige Oberflächenschutzsysteme können einerseits aus Auskleidungen mit Kunststoff-, Metall-, Steinzeug- oder Keramik und andererseits aus Beschichtungen auf Basis von Polymeren oder Polymersilikaten bestehen. In */Orl10a/* sowie */Str08/* werden diese Möglichkeiten erläutert. Die Applikation eines möglichst nachhaltigen

Systems muss aus den jeweiligen örtlichen Randbedingungen sowie den daraus bestimmbaren diskreten Einwirkungsgrößen und -kombinationen abgeleitet werden /Str08/. Ein herausragender Lösungsansatz ist die Verwendung von Glas zum Schutz der Abwasseranlagen. Hierfür gibt es in Deutschland zwei unterschiedliche Methoden, deren Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit in der Arbeitsgruppe 4 am ibac untersucht wurde.

7.2.2 VORSTELLUNG DER BEIDEN GLASSYSTEME

Bild 7-1 stellt die beiden Glasarten, die im Rahmen von Pilotprojekten zur Instandsetzung von Abwasseranlagen eingesetzt werden, gegenüber. Beim so genannten Betoglass®-Halbzeug der Firma Betoglass Deutschland GmbH handelt es sich um Glasscheiben mit einer Dicke von 4 bis 10 mm auf denen ein Polytransmitter aufgebracht ist /Klo04/. Über einen vor Ort aufzutragenden Kleber erfolgt die Ankopplung an den Betonuntergrund. Die Abmessungen der Glasscheiben werden im Wesentlichen durch den Transport und die Handhabbarkeit begrenzt. In einem Abwasserkanal kamen gekrümmte Scheiben mit einer Fläche von bis zu 1,88 m² zum Einsatz. Die Fugenbreite zwischen den Betoglass-Scheiben betrug in diesem Fall 10 mm. Die Fugen müssen mit einem geeigneten Material abgedichtet werden.

Boro-Silikat-Dünngläser der Firma Schott AG ähneln mit einer Dicke von etwa 0,3 mm einer steifen Folie. Die Gläser lassen sich vorsichtig in einer Richtung krümmen. Sie werden mit Polysilikatkleber auf den vorbehandelten Betonuntergrund überlappend aufgeklebt. Die nachfolgend geklebte Glasfolie überlappt die bereits verklebte Folie. Somit entstehen Bereiche mit Glasüberlappungen und Fugen werden vermieden /Hil06/.



Natrium-Silikat-Glas, Float- bzw. ESG-Glas,
Glasscheibendicke: 4-10 mm



Boro-Silikat-Dünnglas,
Glasscheibendicke: etwa 0,3 mm

Bild 7-1: Gegenüberstellung der beiden Glasarten

Beide Systeme erfordern die Zugänglichkeit der Abwasseranlage sowie einen ebenen, weitestgehend trockenen Betonuntergrund mit ausreichender Haftzugfestigkeit. Um langfristige Schäden zu vermeiden, darf der Sulfatgehalt in der Betonrandzone nicht erhöht sein.

7.2.3 LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER GLASSYSTEME

HAFTZUGFESTIGKEIT

Zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit wurden Betonplatten mit den beiden Glassystemen bestückt. Je Platte wurden fünf Ringnuten mit einem Durchmesser von 50 mm in das Verbundsystem gebohrt. Anschließend erfolgte die Ermittlung der Haftzugfestigkeit über auf die Oberfläche aufgeklebte Stahlstempel. Weiterhin wurde festgehalten, in welcher Verbundebene das Versagen auftrat (siehe Bild 3–17).

Die Ergebnisse der Haftzugprüfungen am Betoglass-System sind in Tab. 7–1 zusammengefasst. Bei den fünf Versuchen trat jeweils ein Versagen zwischen Transmitter und Kleber auf. Es wurde eine mittlere Haftzugfestigkeit von $0,53 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Transmitter und Glas wurden erneut Stahlstempel auf das Glas und den Transmitter geklebt und Zugversuche durchgeführt. Die Haftzugfestigkeit zwischen Transmitter und Glas betrug $0,83 \text{ N/mm}^2$.

Tab. 7–1: Haftzugfestigkeit des Betoglass-Systems auf Betonplatten

Prüfkörper	Prüfstelle	Haftzugfestigkeit	Bruchbeschreibung
-	-	N/mm^2	%
Gesamtsystem mit 4 mm Transmitter	1	0,50	100 Transmitter / Kleber
	2	0,50	
	3	0,59	
	4	0,58	
	5	0,46	
	MW	0,53	
Glas / Transmitter	1	0,75	100 Transmitter / Glas
	2	0,85	
	3	0,89	
	MW	0,83	

Ein Versagen des Dünnglassystems auf den Betonplatten wurde im Haftzugversuch nicht erreicht. Bei den Versuchen trat jeweils bei etwa $2,5 \text{ N/mm}^2$ ein Versagen im Beton auf.

RISSÜBERBRÜCKUNG

Zur Ermittlung der Rissüberbrückungsfähigkeit wurden Betongrundkörper in den Abmessungen $60 \times 60 \times 6 \text{ cm}^3$ mit einer zentrisch angeordneten Sollrissstelle und einem speziellen Bewehrungskorb, zur definierten Einstellung variabler Rissbreiten, hergestellt und im Dreipunktbiegeversuch an der Sollrissstelle aufgerissen. Danach erfolgte das Aufbringen der Glassysteme in der in Bild 7–2 dargestellten Anordnung.

Zur Prüfung der Fähigkeit der Glassysteme Rissbewegungen aus dem Betonuntergrund überbrücken zu können, wurden die Probekörper über die einbetonierten Gewindestangen mit der Einspannvorrichtung der hydraulischen Zug-Prüfmaschine verbunden und weggesteuert auf Zug belastet (Bild 7–3). Während des Versuchs erfolgte die Erfassung der Rissaufweitung jeweils rechts und links der Betonplatte mittels induktiver Wegaufnehmer. Teilweise wurde der Riss bis zur Zerstörung des Glasverbundsystems aufgeföhren oder der Riss wurde bei etwa $0,20 \text{ mm}$ an den Seitenflächen in der vorgesehenen Breite fixiert.

Das Betoglass-System nach Variante A wies bei einem Weg von etwa 0,3 mm einen Riss im Betoglass auf (Bild 7-4). Ein Abriss der Fugenflanke erfolgte bei 0,55 mm. Am Kraft/Weg-Verlauf der beiden Wegaufnehmer ist zu erkennen, dass die Aufweitung des Risses nicht gleichmäßig über die Plattenbreite erfolgt: Die Plattenseite mit zwei Glasplatten ist steifer. Um ein derartig unsymmetrisches Verhalten auszuschließen, wurde das Betoglass-System nach Variante B, Bild 7-2, aufgebracht.

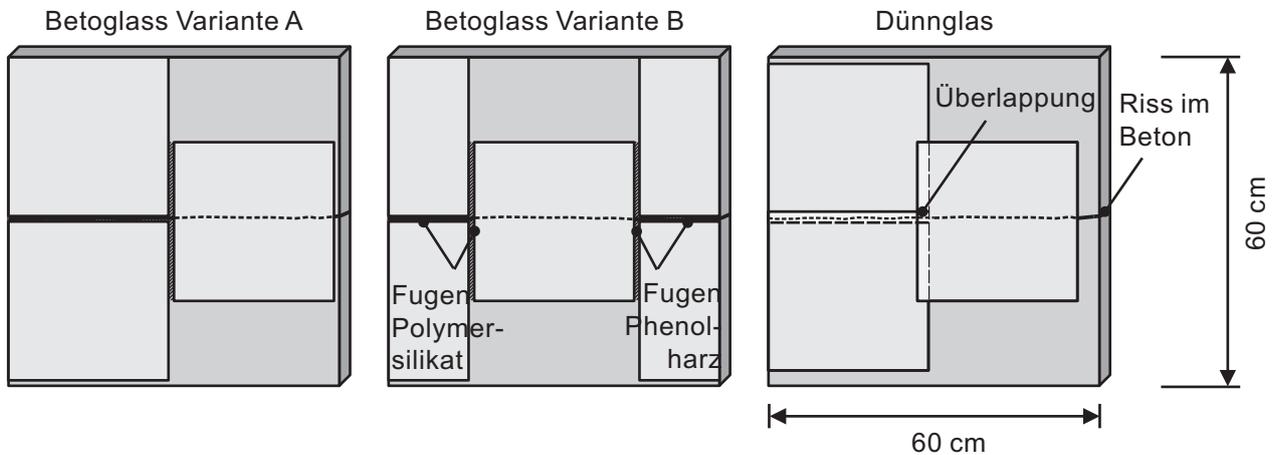


Bild 7-2: Anordnung der Glassysteme auf den großformatigen Betonkörpern

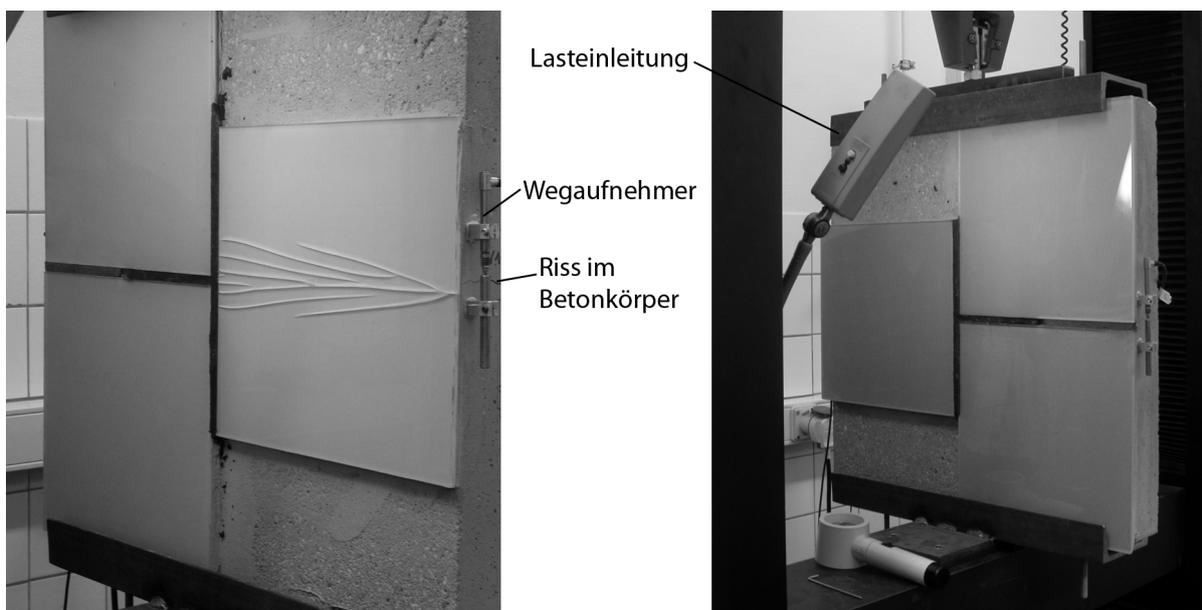


Bild 7-3: Durchführung des Rissüberbrückungsversuchs

Die Versuchsergebnisse mit Variante B zeigen jedoch in Bild 7-4, dass die Fähigkeit des Systems zur Rissüberbrückung durch eine symmetrische Anordnung der Scheiben nicht weiter erhöht wird. Bei einem Weg von etwa 0,2 mm entstand ein Riss in der mittig angeordneten Betoglass-Scheibe. Durch die symmetrische Anordnung der Scheiben erfolgte jedoch der Abriss der Fugenflanke erst bei etwa 1,1 mm.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen, wie z. B. Rissverschiebung, Schichtdicke des Transmitters, lokale Schäden im Glas, Zugfestigkeit des Glases kann die am Bauwerk überbrückbare Rissbreite nicht genau abgeschätzt werden. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen sollte die überbrückbare Rissbreite zwischen 0,1 und 1 mm liegen. Die überbrückbare Rissbreite ist für jeden Einsatzfall neu zu ermitteln.

Die mit Dünnglas bestückte Probe versagte bei etwa 0,05 mm, indem erwartungsgemäß oberhalb des Betonrisses ein Riss im Glas entstand.

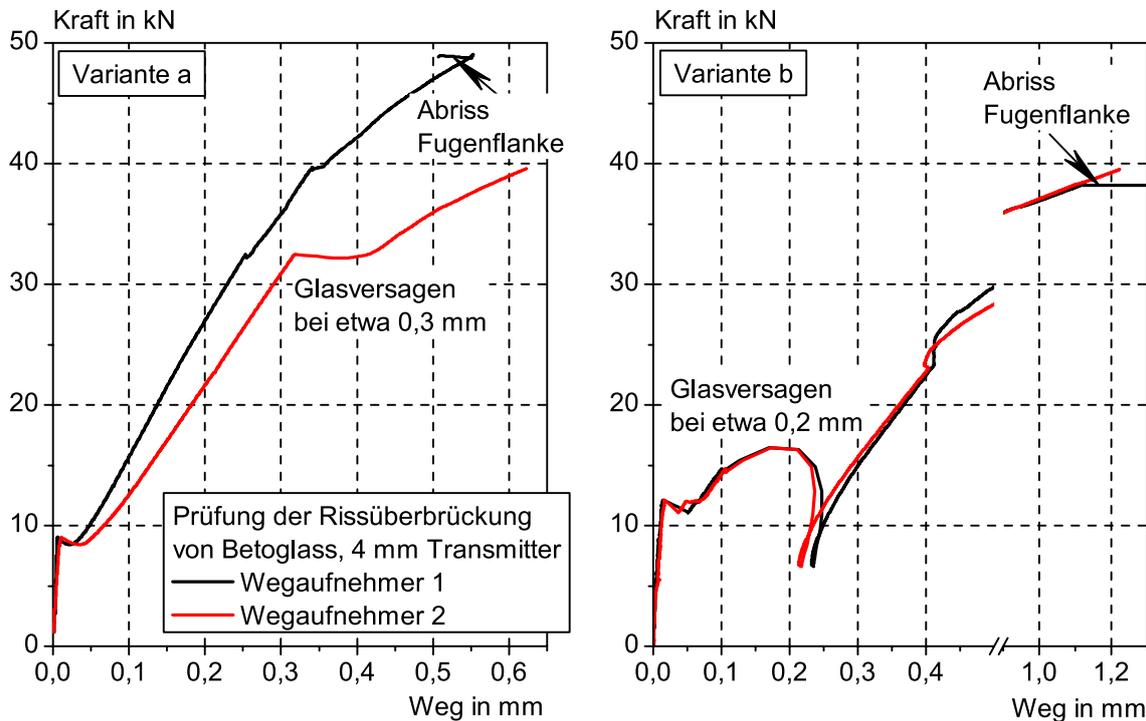


Bild 7-4: Kraft-Rissöffnungsverlauf während des Rissüberbrückungsversuchs am Betoglass

SCHWEFELSÄUREBEAUFSCHLAGUNG

Die Beständigkeit der Fugen bzw. Überlappungsbereiche der Glassysteme gegenüber Schwefelsäure wurde anhand des mit Bild 3–15 beschriebenen Diffusionsversuchs untersucht. Während des Diffusionsversuchs stand an der einen Seite 10%ige Schwefelsäure und an der anderen Seite Wasser an. Über einen Zeitraum von 250 d wurde die Sulfationenkonzentration in dem unterhalb der Probe anstehenden Wassers gemessen.

Die Versuche mit dem Betoglass-System ergaben, dass die Fuge aus Polymersilikat verglichen zur Phenolharzfuge einen deutlich geringeren Durchlasswiderstand gegenüber Sulfationen aufwies. Beim Dünnglas konnte anhand der Sulfatmenge kein eindeutiges Ergebnis ermittelt werden. Beim Ausbau der Proben nach 250tägiger Schwefelsäurebeaufschlagung wurden erhebliche Schäden an dem Betoglass-System mit Polymersilikat und den Dünnglasproben festgestellt.

7.2.4 PILOTPROJEKT ABWASSERKANAL

BETOGLASS IM ABWASSERKANAL

Im Rahmen eines Pilotprojektes wurden 75 m eines Abwasserrohres mit Betoglass-Halbzeug instandgesetzt. Dazu wurden überwiegend gekrümmte ESG-Glasplatten verwendet. Der Rohrdurchmesser betrug 1,60 m. In jedem Rohrquerschnitt wurden drei Glassegmente mit einer jeweiligen Länge von 1,27 m eingeklebt. Der abwasserführende Bereich des Rohres wurde nicht instandgesetzt. Bild 7–5 verdeutlicht die Vorgehensweise. Die geplante Fugenbreite betrug 10 mm.

Die Verklebung der Betoglass-Halbzeuge auf den Betonuntergrund erfolgte mit Kleber, der auf die entsprechende Betonoberfläche und den Polytransmitter des Glases aufgetragen wurde. Danach wurde die Glasscheibe an den Beton angepresst. Der Anpressdruck wurde über Holzleisten bis zum Erhärten des Klebers aufgebracht. Die Dicke der Klebeschicht zwischen Glas und Untergrund betrug rund 2 cm.

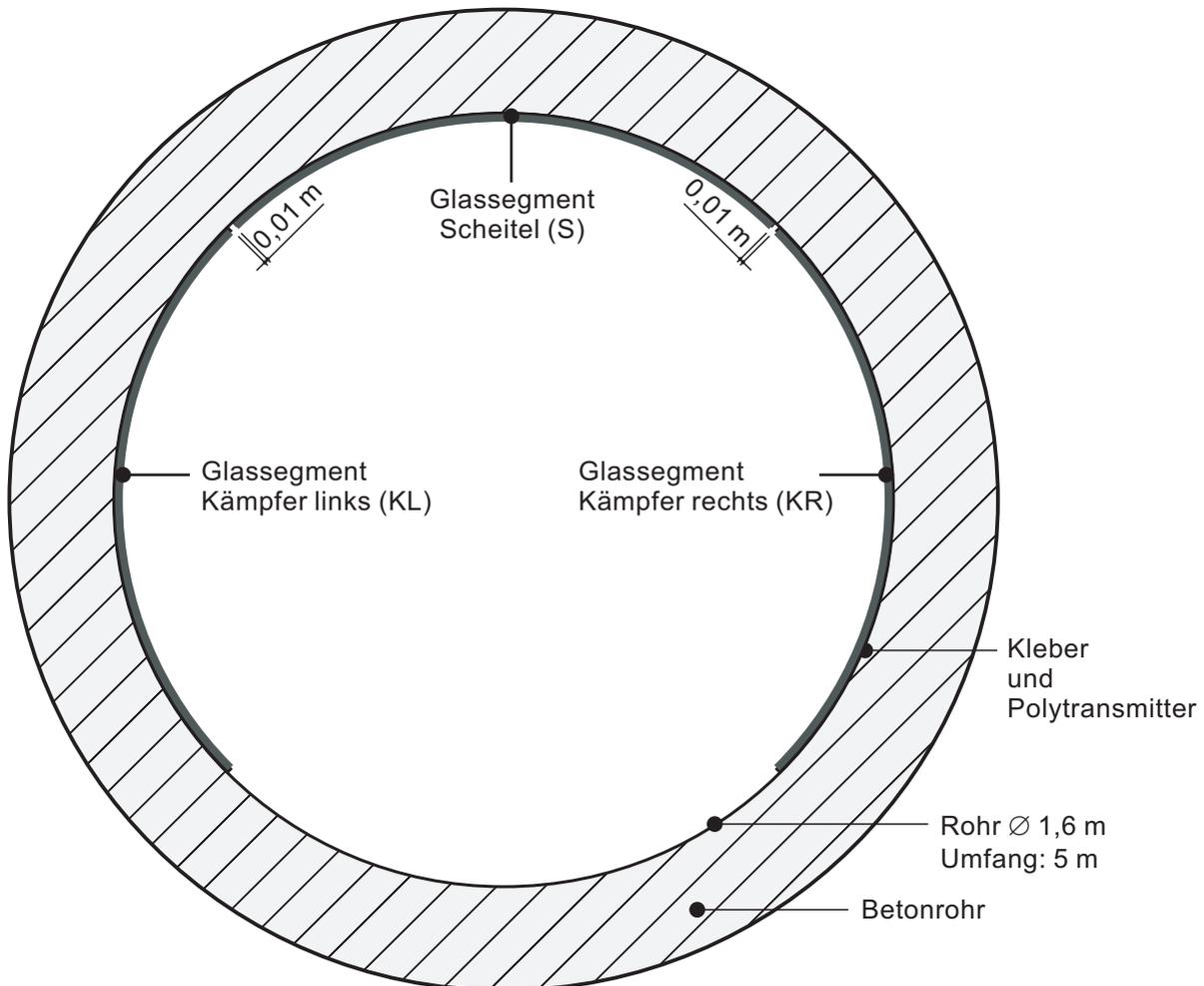


Bild 7-5: Anordnung des Betoglass-Systems im Abwasserkanal – Ansicht im Querschnitt

Zur Abdichtung der Fugen wurde sowohl Polymersilikat als auch Phenolharz verwendet. Die Trennung der starren Fugenabdichtung vom Untergrund erfolgte mittels eines elastischen Fugenbandes (siehe Bild 7-6). Beide Materialien konnten in die Fugen eingearbeitet werden, wobei die Verarbeitung des Polymersilikats einfacher war. Das vergleichsweise starrere Phenolharz wurde durch das Fugenband nach außen gedrückt. Bild 7-6 ist weiterhin zu entnehmen, dass die angestrebte Fugenbreite von 1 cm unter den schwierigen Arbeitsbedingungen im Kanal nicht immer erreicht wurde.

Der Verbund des Betoglass-Systems zum Untergrund wurde im Abwasserkanal untersucht. Die Untersuchung fand durch Abklopfen der Scheiben mittels einer am Draht befestigten Metallkugel mit einem Durchmesser von 15 mm statt. Das Abklopfrafter wurde etwa zu 5 cm gewählt, bei detektierten Hohllagen wurde das Raster entsprechend verdichtet. Die Bereiche mit Hohllagen wurden auf dem Glas markiert (Bild 7-7) und das dadurch entstandene Bild auf Millimeterpapier maßstabsgetreu übertragen. Im Anschluss wurden anhand der Darstellungen die Flächen der Hohllagen im Randbereich sowie in der Glasmitte bestimmt.

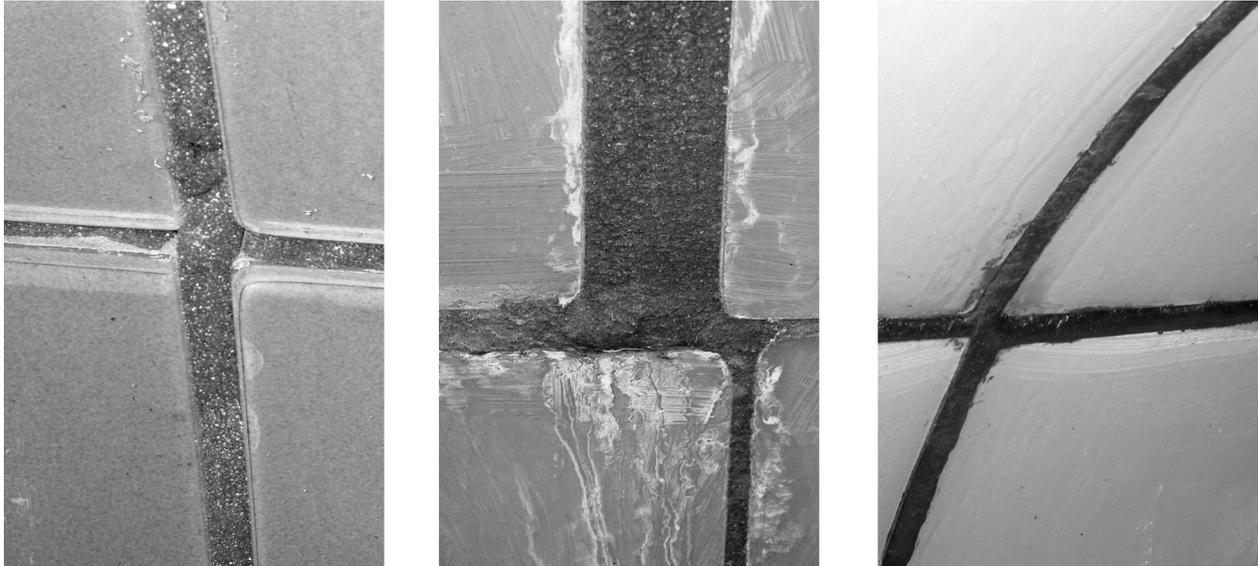


Bild 7-6: Links: Elastisches Fugenband in den Fugen, Mitte: Fuge mit Polymersilikat, Rechts: Fuge mit Phenolharz

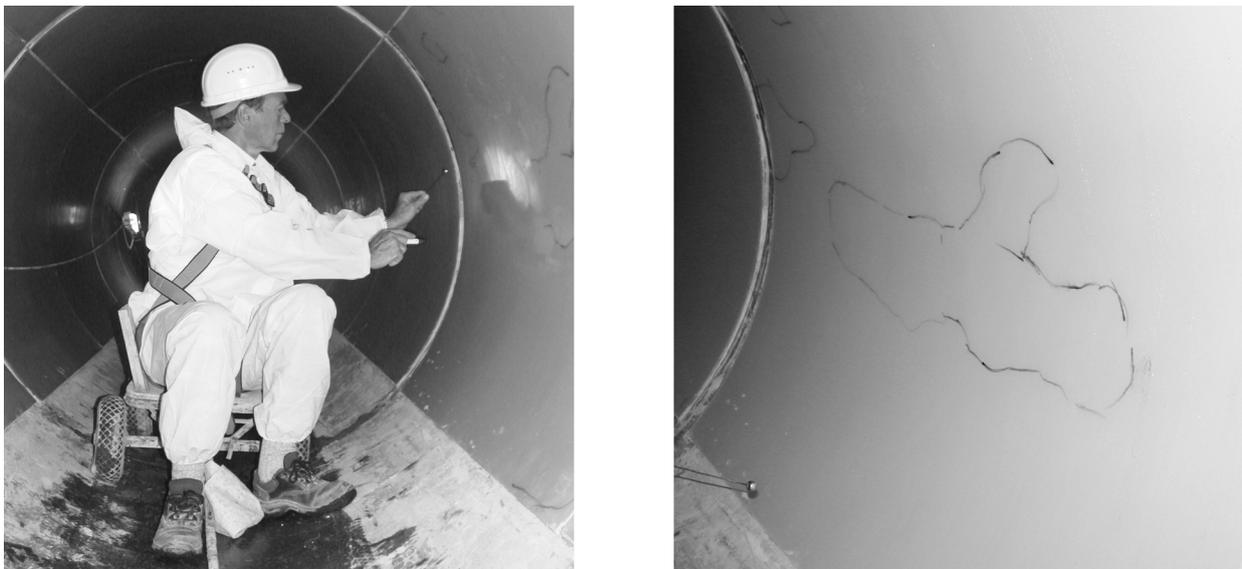


Bild 7-7: Untersuchung des Verbundes zwischen Betoglass-System und Untergrund im Kanal

Im Kanal wurden insgesamt 45 Scheiben hinsichtlich Hohlstellen untersucht. Im Mittel ergaben sich Hohllagen von 14 % bezg. auf die Scheibenfläche, davon liegen 4 % im Randbereich und 10 % in Scheibenmitte. Je Scheibenseite werden die ersten 10 cm der Scheiben als Randbereich bezeichnet. Eine Scheitelscheibe weist mit 70 % bezg. auf die Scheibenfläche die größte Hohllage auf. Das Eigengewicht dieser Scheibe kann bei einer angenommenen Haftzugfestigkeit der Schichten untereinander und zum Untergrund von lediglich $0,1 \text{ N/mm}^2$ dennoch gehalten werden. In Bild 7-8 ist dargestellt, dass im mittleren Bereich der Scheiben wesentlich häufiger Hohllagen auftreten als in den Randbereichen. Insbesondere die Scheiben im Scheitel liegen im mittleren Bereich zum Teil hohl, dies kann auf die erschwerten Arbeitsbedingungen zurückgeführt werden.

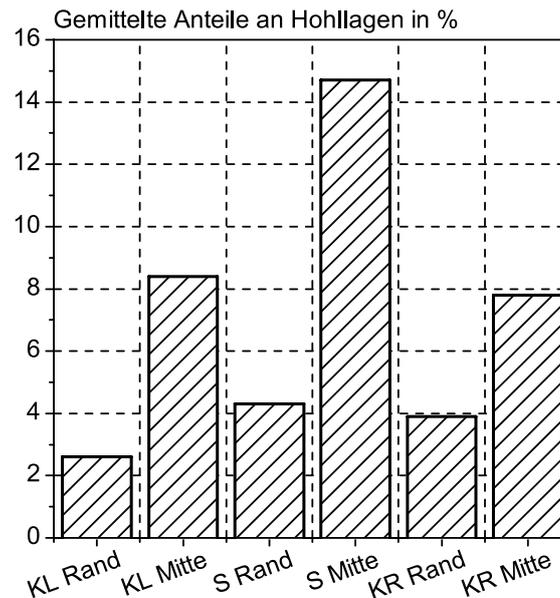


Bild 7–8: Gemittelte prozentuale Hohllagen des Betoglass im Kanal, getrennt nach Hohllagen im linken Kämpfer (KL), rechten Kämpfer (KR), Scheitel (S) sowie im Randbereich (äußeren 10 cm) bzw. mittig gelegen.

BORO-SILIKAT-DÜNNGLAS

Die Instandsetzung weiterer Rohrsegmente des Abwasserkanals erfolgte mit Boro-Silikat-Dünngläsern. Die Boro-Silikat-Dünngläser wurden mit Polysilikatkleber auf den vorbehandelten Untergrund überlappend aufgeklebt. Dazu wurde der Kleber mit einer Schichtdicke von etwa 6 bis 10 mm mittels eines Zahnpachtels mit Dreieckszahnung auf den Untergrund aufgebracht. Im Anschluss wurde das Dünnglas von einer Kante aus beginnend in den Kleber eingewalzt. Die nachfolgend geklebte Glasfolie überlappt die bereits verklebte Folie um etwa 50 mm.

Im ersten Ansatz wiesen die in dieser Form verlegten Glasfolien, bis auf sehr wenige Ausnahmen, Schäden (Glasbrüche, Blasen unter den Folien, mangelnde Haftung zum Untergrund) auf. Die Schäden wurden auf hohe Untergrundfeuchten zurück geführt. Im zweiten Ansatz wurden die Rohre des Abwasserkanals zunächst getrocknet. Im Abwasserkanal lag zum Zeitpunkt der Glasapplikation eine Temperatur von etwa 18 °C und eine relative Luftfeuchte von rund 60 % vor. Bild 7–9 zeigt das mit Dünnglas instand gesetzte Abwasserrohr.

KANALBEGEHUNG NACH 5-JÄHRIGER NUTZUNG

Nach der Instandsetzung des 150 m langen Teilstückes eines Abwasserkanals mit den beiden Glasystemen wurde das Kanalstück wieder in Betrieb genommen. Zur Inspektion des Kanalzustandes erfolgte erstmalig nach 5 Jahren eine Begehung des Kanals. Hierzu wurde die Abwasserzufuhr lediglich temporär reduziert, eine Kanalreinigung erfolgte nicht. Im Rahmen der Begehung wurden keine sichtbaren Schäden an den Glassystemen und im Bereich der Fugen festgestellt. Die Glaselemente haben sich nicht vom Untergrund gelöst. Die bereits während des Einbaus gerissenen Glasscheiben weisen ebenfalls keine weitergehende lokale Schädigung auf. Vermutlich im Bereich der Rohrfugen ist das Dünnglas an einigen Stellen gerissen, eine Schädigung wurde jedoch nicht festgestellt (Bild 7–10). Durch die in der Kanalatmosphäre vorhandenen Inhaltsstoffe wurden die Glasflächen nicht angegriffen, die eingebrachten Materialien zur Fugenausbildung im Bereich der Betoglass-Auskleidung

wiesen keine augenscheinlichen Schäden auf /Gro10/.

Weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Veränderung der Hohllagen des Betoglass-Systems, des Sulfatgehaltes im Beton unterhalb der Fugen sowie der Haftzugfestigkeiten sind nach etwa 10 Jahren Nutzung geplant.



Bild 7-9: Abwasserrohr mit Boro-Silikat-Dünnglas instandgesetzt

7



Bild 7-10: Zustand der Glassysteme nach 5jähriger Nutzung des Abwasserkanals

7.2.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Laboruntersuchungen und die Probeinstandsetzung des Abwasserkanals zeigen, dass beide Glassysteme große Potentiale aufweisen, wenngleich insbesondere bei der Applikation des Glases am bestehenden Bauwerk noch zusätzlicher Entwicklungsbedarf besteht. Zum einen ist die Ausführung der Arbeiten durch entsprechende Arbeitsgeräte zu optimieren und zum anderen ist die Gestaltung der Fugen bzw. Überlappungsbereiche weitergehend zu untersuchen.

Das Betoglass-System weist eine Rissüberbrückungsfähigkeit auf, die unter anderem durch die Eigen-

schaften des Transmitters gesteuert wird. Die Beständigkeit gegenüber Schwefelsäure wird maßgeblich durch das Fugenmaterial bestimmt. Hier hat sich die Phenolharzfuge als sehr beständig herausgestellt.

Das Dünnglas-System zeichnet sich durch die Kompaktheit der Glasfolien aus. Es besitzt bei entsprechender Ausführung eine gute Haftung zum Untergrund. Die Verarbeitung der Glasfolien erfordert jedoch ein hohes Maß an Sorgfalt und Geschick.

7.3 OBERFLÄCHENSCHUTZ MIT TEXTILBETONEN

7.3.1 ALLGEMEINES

Vor zwölf Jahren etablierte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) die beiden Sonderforschungsbereiche 528 und 532 an der TU Dresden und der RWTH Aachen um die Verwendung technischer Textilien in zementgebundenen Materialien grundlegend zu erforschen */Cur11/*. Die praktische Anwendung von Textilbeton steht heute noch am Anfang. Nach einer Dekade grundlegender Forschung verdeutlichen die ersten Pilotanwendungen jedoch eindrucksvoll, dass die Einsatzmöglichkeiten von Textilbeton enorm sind.

Beim textilbewehrten Beton werden die auftretenden Zugspannungen von den in der Zugzone einbetonierten technischen Textilien abgetragen. Durch die damit verbundene Eliminierung der Stahlbewehrung existiert keine Mindestbetonüberdeckung mehr. Dieser neue Baustoff ermöglicht somit die Erschließung innovativer und anspruchsvoller Anwendungsfelder sowohl im Bereich des Neubaus als auch in der Bauwerkserhaltung. Generell weist der Textilbeton gegenüber herkömmlichen Materialien in folgenden Anwendungen Vorteile auf:

- Dünnwandige Bauteile (Dicke ≥ 10 mm) mit hoher Tragfähigkeit.
- Beliebige, auch komplexe Bauteilgeometrien durch leicht verformbare bzw. dreidimensional herstellbare technische Textilien.
- Realisierung spezieller Oberflächen.
- Geringe Bauteilgewichte bei hoher Tragfähigkeit.

Basierend auf den an den Universitäten erarbeiteten Werkstoffkenntnissen erfolgt nun zunehmend die Anwendung von Textilbetonen auch in der Bauwerkserhaltung */Orl11a/*. Neben Wärmedämmverbundsystemen aus Textilbetonen steht der Einsatz textilbewehrter Mörtel- bzw. Betonschichten zur Verstärkung/Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen im Focus. Dabei erfolgt das Einbetten der flexiblen Textilien in den Mörtel lagenweise mit speziellen Laminiertechniken.

Nachfolgend werden zunächst die Materialien des Textilbetons kurz erläutert, um darauf basierend auf die Instandsetzung massiver Betonbauteile mit textilbewehrten Spritzmörtelschichten detailliert einzugehen. Diese neue Methode wurde mit Hilfe der Förderung durch die Bundesanstalt für Wasserbau in der Arbeitsgruppe 4 am ibac entwickelt.

Darüber hinaus wird Textilbeton zunehmend zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen eingesetzt. Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines Stahlbetonbauteils kann durch das Aufbringen einer Verstärkungsschicht aus Textilbeton in der Zugzone erhöht werden */Han11/*. Dazu wird Feinbeton im Sprühverfahren aufgetragen und die Textilien werden in die aufgespritzten Feinbetonschichten

eingelegt. Durch das mehrschichtige Auftragen von Feinbeton und Textilien können bis zu vier Lagen Textilien in eine 20 mm dicke Feinbetonschicht im Nassspritzverfahren eingespritzt werden. Gegenüber CFK-Lamellen sind mit dieser Variante höhere Verstärkungsgrade erreichbar /Han10/. Im Vergleich zur Spritzbetonverstärkung mit Stahlbewehrung sprechen die geringen Schichtdicken und das geringe Eigengewicht für den Textilbeton. Mittlerweile sind mehrere Bauwerke mit textilbewehrten Verstärkungsschichten ausgestattet. Als Beispiele seien hier die Hyperschale der FH Schweinfurt, das Tonnengewölbe des Finanzamt Zwickaus /Han09/ und der Bahnhofsdurchlass in Kempten genannt.

7.3.2 MATERIALIEN

Zur Herstellung der technischen Textilien werden durchgehende Glas- oder/und Carbonrovings eingesetzt. Diese Rovings bestehen aus einem Bündel von über 500 Fäden (Filamente), deren Durchmesser zwischen 12 und 30 μm liegen (Bild 7–11). Zur Verarbeitung der Filamente werden diese im Herstellungsprozess mit einer Schlichte (Polymer mit einer Dicke von wenigen nm) überzogen.

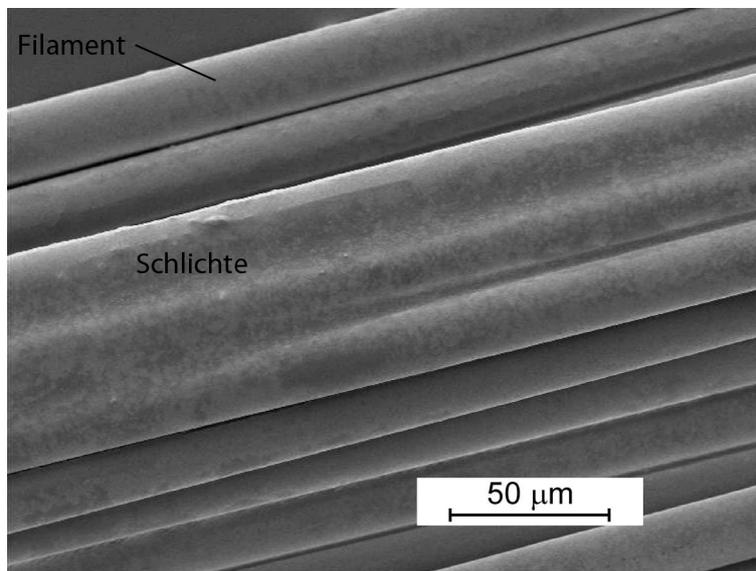


Bild 7–11: Rasterelektronenaufnahme eines AR-Glasrovings

Aus den Rovings werden Textilien (Gelege) hergestellt. Bei den Textilien kann die Ausrichtung der Rovings sowie Maschenweite variiert werden. Bild 7–12 zeigt exemplarisch einige Textilien aus Glas- bzw. Carbonrovings.

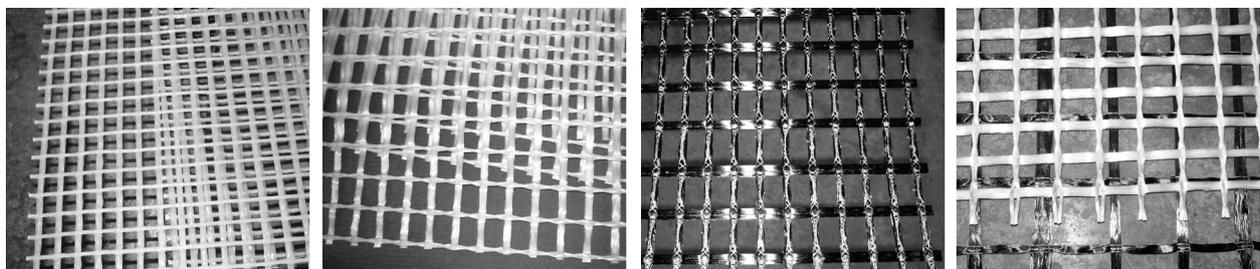


Bild 7–12: Vier Beispiele für Textilien die als Bewehrung von Textilbetonen zum Einsatz kommen

Die technischen Textilien werden als Bewehrung während der Herstellung des Betonbauteils in den Beton eingebettet. Bild 7–13, oben, vermittelt einen Eindruck von dem Verbundwerkstoff Textilbeton. Anhand der Bilder wird deutlich, dass nur ein bestimmter Anteil von Filamenten („äußere“ Filamen-

te) im direkten Kontakt mit dem Beton steht und die Kräfte der Bewehrung über Schubspannungen in den Beton einleiten. Die „inneren“ Filamente stehen im Kontakt zu anderen Filamenten bzw. zu Poren. Bild 7–13, unten links, zeigt eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM-Aufnahme) eines AR-Glasrovings, der im Beton eingebettet ist. Die Probe wurde mit Epoxidharz verpresst, um ein Verrutschen der Filamente während der Probenpräparation zu verhindern. Die im Elementkontrastbild schwarz erscheinenden Bereiche sind mit Epoxidharz gefüllte Poren. Die im Beton eingebetteten Rovings weisen somit Luft- und Bindemitelein schlüsse auf, woraus eine unregelmäßige Filamentverteilung in jedem Probenquerschnitt resultiert. Die Leistungsfähigkeit eines Rovings im Beton hängt somit wesentlich vom Anteil der inneren und äußeren Filamente über der Einbettungslänge ab. Die Nutzung des gesamten Bewehrungsquerschnitts für den Lastabtrag ist durch die Tränkung der Textilien mit Polymeren möglich. Die Tränkung der Textilien mit Polymeren homogenisiert das Bewehrungsmaterial und ermöglicht die Aktivierung der inneren und äußeren Filamente (Bild 7–13, unten rechts). Die Tränkung der Textilien erfolgt häufig mit Dispersionen auf Styrol-Butadien- und Acrylatbasis. Mittels einer Tränkung mit Reaktionsharzen, hier liegen bisher Erfahrungen mit Epoxidharz vor, wird die Steifigkeit, die Tragfähigkeit und die Beständigkeit der Textilien jedoch im Vergleich zu den Dispersionen nochmals deutlich erhöht /Rau11b/, /Schö11/.

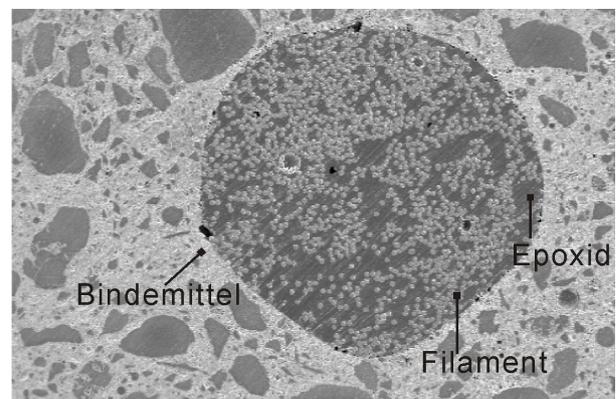
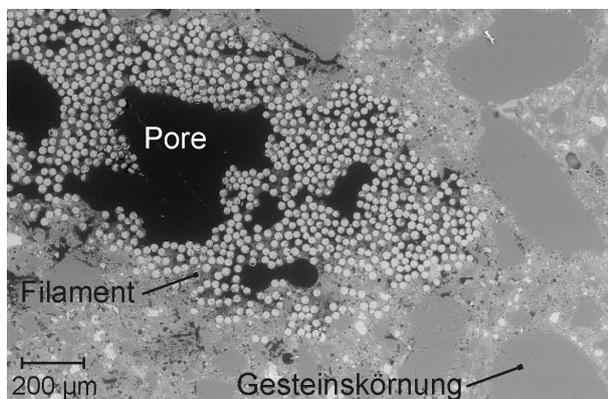


Bild 7–13: Oben: AR-Glasroving im Textilbeton. Unten links: REM-Aufnahme eines AR-Glasrovings im Beton. Unten rechts: REM-Aufnahme eines getränkten AR-Glasrovings im Beton

Das Material der Textilien aus Glasrovings besteht aus so genanntem „Alkali-resistentem (AR)-Glas“. Dem AR-Glas wird in der Schmelze etwa 16 bis 20 M.-% Zirkoniumdioxid zugeben, um die Beständigkeit im alkalischen Milieu zu erhöhen. Dennoch verlieren AR-Glastextilien im Beton infolge einer Freibewitterung in Deutschland über die Lebensdauer von 50 Jahren voraussichtlich rund 36 % ihrer Zugfestigkeit /Orl05/. Bild 7–14 verdeutlicht die zeitliche Entwicklung des Festigkeitsverlustes. Die Modellierung wurde durch Langzeituntersuchungen über 4,5 Jahre untermauert. Während eine Temperaturerhöhung ebenso wie eine kontinuierliche Wasserlagerung zu einer Erhöhung des Festigkeitsverlustes führen, bedingt eine Einschränkung der Korrosion auf Zeiten in denen der Beton komplett wassergesättigt ist im Modell eine Reduktion des Festigkeitsverlustes. Durch die Tränkung der Textili-

en mit Epoxidharz kann der Festigkeitsverlust deutlich reduziert werden /Rau11b/. Die Arbeiten von Herrn Büttner im Rahmen seiner Promotion deuten auf Festigkeitsverluste über eine Bauteillebensdauer von 50 Jahren von unter 15 % hin.

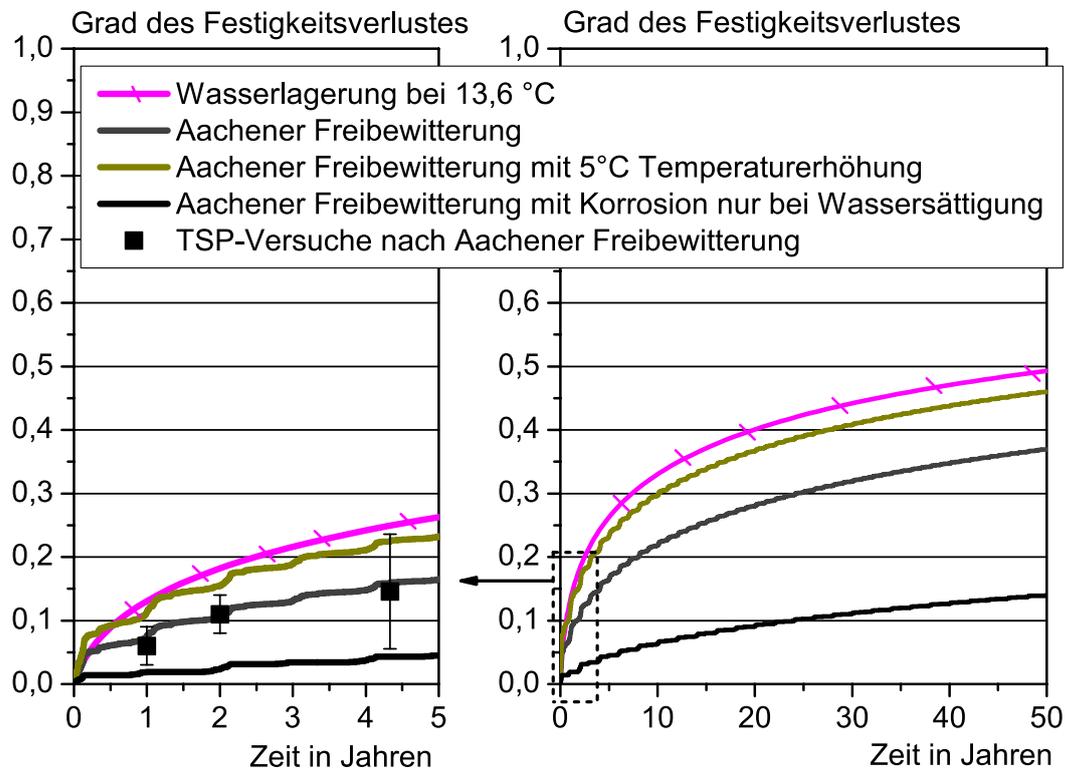


Bild 7-14: Einfluss der Bewitterung auf den Festigkeitsverlust der AR-Glasbewehrung im Textilbeton

Die Art des Betons variiert mit den Einsatzgebieten. Textilbetone weisen im Allgemeinen nur Gesteinskörnungen bis 4 mm auf und werden deswegen als Feinbetone bezeichnet. Detaillierte Angaben zur Zusammensetzung von Textilbetonen kann /Bra06/ entnommen werden. Während in Fertigteilwerken häufig fließfähige Betone zum Eingießen der Textilien verwendet werden, ist in der Bauwerkserhaltung der Einsatz von höherviskosen Betonen bis hin zu Spritzmörteln in Kombination mit einem lagenweisen Einbau der Textilien verbreitet /Orl11a/.

Zur Herstellung textildbewehrter Betone werden bisher vier unterschiedliche Verfahren eingesetzt:

- Vergießen /Bra10b/,
- Laminieren /Rau10/, /Hor09/,
- Nasssprühverfahren /Bra07/, /Han09/
- Trockenspritzverfahren /Orl11c/

Beim Vergießen werden die Textilien vor dem Betonieren in der Schalung eingebaut und der Feinbeton wird von einer Seite in die Schalung eingegossen. Beim Laminieren werden hingegen der Feinbeton und die Textilien lagenweise händisch auf einen Untergrund appliziert. Das Nasssprühverfahren beinhaltet ebenfalls den abwechselnden Einbau von Textilien und Beton nur mit dem Unterschied, dass der Feinbeton aufgesprüht wird. Dabei wird die fertige Feinbetonmischung über einen Schlauch und eine Düse mit 2 bis 4 bar an den Untergrund gesprüht. Beim Trockenspritzverfahren wird das Wasser erst an der Spritzdüse zur Trockenmischung zugegeben. Im Vergleich zum Nasssprühverfahren wird hierbei mit größeren Drücken gearbeitet. Das Trockenspritzverfahren ist Stand der Technik

für übliche Instandsetzungen mit Mörteln und Betonen und aufgrund der weiten Verbreitung dieser Technologie auch für Textilbetone attraktiv. Neben dem Trockenspritzverfahren können Mörtel und Betone auch im Nassspritzverfahren verarbeitet werden. Dies wurde bisher jedoch nicht für textilbewehrte Betone eingesetzt und erscheint aufgrund der Materialverarbeitung in Etappen (Spritzmörtel/Textil/Spritzmörtel/Textil/Spritzmörtel) und der dünnen Mörtelschichten auch nicht so wirtschaftlich wie das Trockenspritzverfahren. In Tab. 7-2 sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren gegenübergestellt.

Tab. 7-2: Vor- und Nachteile bisheriger Herstellverfahren für textilbewehrte Betone

Herstellverfahren	Vorteile	Nachteile
Vergießen	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Betonierleistung • Definierte Position der Bewehrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Feinbeton muss durch das Textil fließen, d. h. große Maschenweiten, wenige Textillagen (reduzierter Bewehrungsgrad) sind Voraussetzung • Hoher Fließmittelanteil erforderlich • Kaum in der Instandsetzung einsetzbar
Laminieren	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlstellenfreier Verbund zwischen Textilien und Feinbeton • Hoher Bewehrungsgrad möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Welligkeit im Textil aufgrund händischen Anpressdrucks • Hoher Zeitaufwand
Nasssprühverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • In der Instandsetzung einsetzbar • Hoher Bewehrungsgrad möglich • Lange Förderwege des Materials zum Einbauort möglich und schnellere Betonapplikation als beim Laminieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Verdichtungsgrad, da Applikation mit niedrigem Druck; ggf. händisches Verdichten • Gefahr der Schlauchverstopfung, begrenzte Verarbeitbarkeitszeit
Trockenspritzverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • In der Instandsetzung einsetzbar • Bekannte, weit verbreitete Technologie • Lange Förderwege des Materials zum Einbauort möglich und schnellere Betonapplikation als beim Laminieren und Nasssprühverfahren • Hoher Verdichtungsgrad / gute Verdichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Staubentwicklung • Rückprall • Relativ steife Textilien erforderlich, um Welligkeit durch Anpressdruck zu vermeiden • Textiltränkung, auch zum Schutz der Textilien, erforderlich

7.3.3 TEXTILBEWEHRTE SPRITZMÖRTELSCHICHTEN ZUR INSTANDSETZUNG VON WASSERBAUWERKEN

PROBLEMSTELLUNG

In der ZTV-W Leistungsbereich 219, Ausgabe 2004, (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau) /ZTVW/ und dem zugehörigen BAW-Merkblatt "Spritzmörtel" sind für die Instandsetzung massiver Wasserbauwerke mit geringer festen Betonuntergründen erstmals Anforderungen an geeignete Instandsetzungsmörtel für Schichtdicken bis maximal 6 cm formuliert /Wes06/. Die Anpassung der Materialeigenschaften des Instandsetzungsmörtels an Festigkeit und Verformungsverhalten des Betonuntergrundes ist eine notwendige, aber nicht in jedem Fall ausreichende Voraussetzung für eine dauerhafte Instandsetzung. Gerade ältere, instandsetzungsbedürftige Wasserbauwerke bestehen nämlich häufig aus massigen, unbewehrte Betonbauteile mit Rissen und offenen Arbeitsfugen (Bild 7-19) /Mau04/. Die Rissbreiten betragen teilweise über 1 mm. Aufgrund tages- und insbesondere

jahreszeitlicher Temperaturänderungen sind Rissbreitenänderungen von bis zu etwa 0,6 mm möglich. Zur groben Abschätzung der Rissbreitenänderung wurde von einem Abstand der Arbeitsfugen von 1,2 m und einer Temperaturänderung von 50 K ausgegangen. Über derartige Risse können Wasser und Schadstoffe in das Bauteil eindringen und zu einer Reduzierung der mit der Instandsetzungsmaßnahme angestrebten Nutzungsdauer führen.

Die Anordnung einer Bewehrung im Spritzmörtel zur Rissverteilung ist in ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, wegen der Korrosionsgefährdung des Bewehrungsstahls bei derart geringen Betondeckungen nicht vorgesehen. Dies war angesichts der skizzierten Rissproblematik zwar bereits bei der Erstellung der ZTV-W durchaus als kritisch betrachtet worden, alternative technische Lösungen standen zum damaligen Zeitpunkt allerdings noch nicht zur Verfügung.

Im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) initiierten und beauftragten und vom Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen realisierten Forschungsvorhabens sollte vor diesem Hintergrund untersucht werden, inwieweit mit Hilfe textilbewehrter Spritzmörtel eine Verteilung eines im Altbetonuntergrund vorhandenen Risses auf viele feine Risse im Instandsetzungsmörtel möglich ist. Die Spritzmörtel sollten dabei die Anforderungen der ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, erfüllen.

Zur Realisierung dieses Ziels wurde ein nach ZTV-W LB 219 für A3-Betonuntergründe zugelassener Spritzmörtel (S-A3 Mörtel) ausgewählt und mit Textilien bewehrt. Die Altbetonklasse A3 ist gemäß ZTV-W LB 219, Tabelle 0.2, durch Druckfestigkeiten zwischen 20 und 30 N/mm² und mittlere Abreißfestigkeiten zwischen 1,2 und 1,5 N/mm² (kleinster Einzelwert zwischen 0,8 und 1,0 N/mm²) gekennzeichnet. Zunächst wurden Laboruntersuchungen zur Charakterisierung des neuen Verbundwerkstoffes durchgeführt, im Anschluss hieran folgte die Erprobung an einem Wasserbauwerk.

LABORUNTERSUCHUNGEN - METHODEN

Zur Charakterisierung des neuen Verbundwerkstoffes wurden textilbewehrte Spritzmörtelplatten im Trockenspritzverfahren mit einer Dicke von 30-40 mm (abhängig von der textilen Bewehrung) hergestellt. Aus den Platten wurden jeweils vier Streifenproben mit einer Länge von 500 mm und einer Breite von 100 mm herausgesägt. Die Ermittlung der Bruchlast dieser Streifenproben erfolgte im Zugversuch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm/min. Die Lasteinleitung geschah über aufgeklebte Stahllaschen mit einer Länge von 100 mm.

Zur Bestimmung der Rissverteilung im bewehrten Instandsetzungsmörtel, ausgehend von einem im Betonuntergrund vorhandenen Riss, wurden die in Bild 7–15 dargestellten Rissüberbrückungskörper hergestellt. Zur Herstellung des Betonkörpers wurde der in der ZTV-W LB 219 definierte Grundkörperbeton A3 verwendet. Die Körper hatten eine Breite von 120 mm. Um die freie Dehnlänge der Instandsetzungsschicht zu erhöhen, wurde im Bereich des Risses mittels eines 10 cm breiten Trennstreifens aus Klebeband eine Kraftübertragung zwischen Altbeton und Spritzmörtel unterbunden.

Die Lasteinleitung erfolgte in der Prüfmaschine mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/min über Stahlträger, welche auf den Altbeton aufgeklebt worden waren. Während des Versuches wurde die Rissöffnung im Betonkörper beidseitig über induktive Wegaufnehmer kontinuierlich ermittelt. Es folgten zyklische Versuche mit Rissöffnungen im Betonkörper bis 0,7 mm. Hierbei wurden Rissbreiten, Rissanzahl und Rissabstände im Instandsetzungsmörtel in Abhängigkeit von der Belastung bestimmt.

Zur Beurteilung der Adhäsion zwischen Altbeton/Spritzmörtel sowie Spritzmörtel/Textilien wurden Haftzugversuche durchgeführt. Dazu wurden in den geprüften Rissüberbrückungskörpern Ringnuten im Durchmesser von 50 mm bis in eine Tiefe von 10 mm in den Betonuntergrund gebohrt und

ein zylindrischer Stahlstempel aufgeklebt. Das Abziehen des Stahlstempels erfolgte mit einer Laststeigerungsrate von 100 N/s mit einem Haftzuggerät.

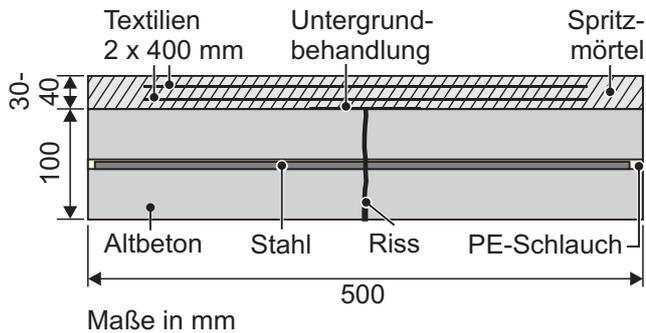


Bild 7-15: Links: Rissüberbrückungskörper zur Untersuchung textilibewehrter Spritzmörtel. Rechts: Herstellung der Rissüberbrückungskörper

LABORUNTERSUCHUNGEN - VERSUCHSPLAN, PROBEKÖRPERHERSTELLUNG

Tab. 7-3 gibt eine Übersicht über die hier diskutierten Materialkombinationen, die mit den oben dargestellten Methoden untersucht wurden. In Bild 7-12 ist der Aufbau der Textilien zusätzlich anhand von Fotos dargestellt.

Tab. 7-3: Untersuchte Materialien

Spritzmörtel	Textilien	
	Bezeichnung	Beschreibung
S-A3, Größtkorn 6 mm	2D-15-09 mit EP	Epoxidharzgetränktes AR-Glastextil, 2400 tex in 0° & 90°, Gitterweite 8 mm x 8 mm
	41-521	Styrol-Butadienbeschichtetes AR-Glastextil, 2400 tex in 0° & 90°, Gitterweite 16 mm x 10 mm
	G 600	Styrol-Butadienbeschichtetes Carbontextil, 3500 tex in 0° & 90°, Gitterweite 14 mm x 7 mm
	41-521 + G 300	AR-Glastextil 41-521 und Styrol-Butadienbeschichtetes Carbontextil, 3500 tex in 0° & 90°, Gitterweite 28 mm x 28 mm

Bei dem Spritzmörtel S-A3 handelt es sich um StoCrete TS 118 der Fa. StoCretec GmbH. Der polymermodifizierte Trockenspritzmörtel (SPCC) wurde entsprechend den Anforderungen der ZTV-W LB 219 zur Instandsetzung von Betonbauteilen von Wasserbauwerken speziell für Betonuntergründe der Altbetonklasse A3 entwickelt. Er ist durch die BAW hierfür zugelassen und gelistet. Tab. 7-4 gibt einen Überblick über die Materialkennwerte des Trockenspritzmörtels. Die Probekörper wurden im Trockenspritzverfahren hergestellt.

Tab. 7-4: Mörtelkennwerte des S-A3 SPCCs (Lagerung: 2 d feucht, danach 23 °C und 50 % r. F.)

	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	E-Modul	Schwindmaß
	N/mm ²			mm/m
Prüfalter 28 d	47,8	8,2	32600	-0,59

Die Herstellung der Proben im Trockenspritzverfahren erfolgte beim Hersteller des Spritzmörtels. Hierbei wurden jeweils vier Rissüberbrückungskörper in einer Schalung zusammengefasst. Somit erfolgte je Materialvariante die Herstellung einer textilbewehrten Spritzmörtelplatte (-> 4 Streifenproben für Zugversuche) und eines Verbundkörpers mit Altbeton A3 unterhalb des textilbewehrten Spritzmörtels (-> 4 Rissüberbrückungskörper, siehe Bild 7–15, rechts). Es wurde lagenweise gearbeitet, d. h. nach der ersten Spritzmörtelschicht von knapp 1 cm Dicke wurde die erste Textillage eingebracht, dann folgten eine Spritzmörtelschicht und die zweite Textillage sowie abschließend die letzte Spritzmörtelschicht. Zielgröße waren jeweils Spritzmörtellagen von 1 cm Dicke. Die Textilien wurden somit einlagig in zwei Ebenen eingebracht. Ausnahme war das Textil 41-521 – hier wurden in der 2. Textillage 2 Lagen Textilien eingebracht. Zusätzlich wurde die Kombination von 41-521 (2lagig) mit G300 (einlagig in der 2. Schicht) geprüft.

Die Oberflächen wurden spritzrau belassen. Nach einer 7tägigen Lagerung unter Folie erfolgten der Probentransport zum Labor sowie die Vorbereitung der Versuchskörper.

Bei der Bemessung der Textilien wurde angenommen, dass die Bruchkraft des Mörtels je laufenden Meter kleiner sein muss als die 1,5fache Bruchkraft der textilen Bewehrung je laufenden Meter. Der Faktor von 1,5 beinhaltet teilweise Materialveränderungen, stellt aber noch nicht den für Bauteilbemessungen erforderlichen Sicherheitsfaktor dar.

UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE - ZUGVERSUCHE

Bild 7–16 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Zugversuche an Streifenproben. Anhand des Kraft-Dehnungsverlaufs ist zu erkennen, dass die Bewehrung nach dem Erstriss des Spritzmörtels Kräfte aufnimmt und eine weitere Rissentwicklung folgt. Mit dem Carbontextil G 600 wurden die höchsten Bruchkräfte (17 kN entspricht etwa 1000 N/mm^2) bei den geringsten Dehnungen erreicht. Insbesondere mit der epoxidharzgetränkten Bewehrung wurde ein fein verteiltes Rissbild mit Rissabständen von etwa 2 bis 3 cm erzielt (Bild 7–16, rechts). Die geringste Lastaufnahme bei den größten Dehnungen traten mit dem AR-Glastextil 41-521 auf. Aufgrund der großen Gitterweite und der Textilart (Dreherbindung über Kettfäden) ist dieses Textil am flexibelsten und weist entsprechend die größte Welligkeit in der Einbettung im Spritzmörtel auf. Das Versagen trat bei allen Probekörpern in der Verbundzone auf. Alle Textilien waren gut im Spritzmörtel eingebettet, es gab keine Lunkerbildung in den Probekörpern

UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE - RISSÜBERBRÜCKUNGSVERSUCHE

Bild 7–17 verdeutlicht die Durchführung der Rissüberbrückungsversuche. Die Last wurde über aufgeklebte Stahlträger in den Altbeton eingeleitet. Die textilbewehrte Spritzmörtelschicht weist keine Verbindung zur Lasteinleitung auf, der Lastübertrag in das Instandsetzungssystem erfolgt allein über die Verbundfuge. Das Versagen des Rissüberbrückungskörpers begann entweder im Altbeton oder durch ein Überschreiten der Textilzugfestigkeit. Das Versagen des Verbundes zwischen SPCC und Textil, entsprechend Bild 7–17, rechts, trat erst nach Überschreiten der Altbetonzugfestigkeit auf.

In Bild 7–18 ist die Rissöffnung im Altbeton über die Kraft aufgetragen. Bild 7–18, links, zeigt die Kraftentwicklung in der textilbewehrten Spritzmörtelschicht während einer Rissöffnung bis zu 0,7 mm. Die gemessenen Kraftabfälle deuten jeweils auf eine Riss- bzw. Mikrorissbildung im Instandsetzungssystem hin. Generell wurde somit mit allen vier Bewehrungsvarianten eine Verteilung der Rissbreitenänderung des einzelnen Untergrundrisses auf mehrere Risse in der Spritzmörtelschicht erreicht. Dabei konnten mit dem epoxidharzgetränkten AR-Glastextil die meisten Risse im Spritzmörtel erzeugt werden (Bild 7–17, rechts).

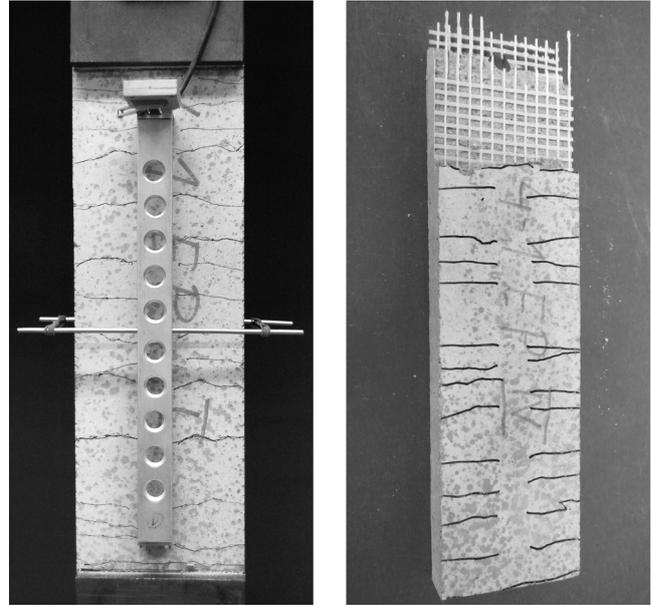
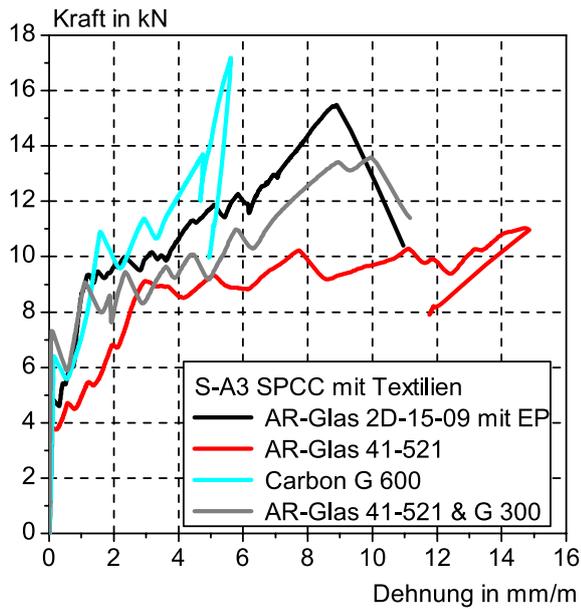


Bild 7-16: Zugversuche an Streifenproben: Links: Kraft-Dehnungsverläufe. Mitte: Durchführung des Zugversuchs. Rechts: Bruchbild einer Streifenprobe mit 2D-15-09 mit EP



Lasteinleitung über
Stahlträger in den Altbeton

textilbewehrter SPCC

induktive Wegaufnehmer

1. Bruch im Altbeton

2. Bruch in der
Verbundebene SPCC

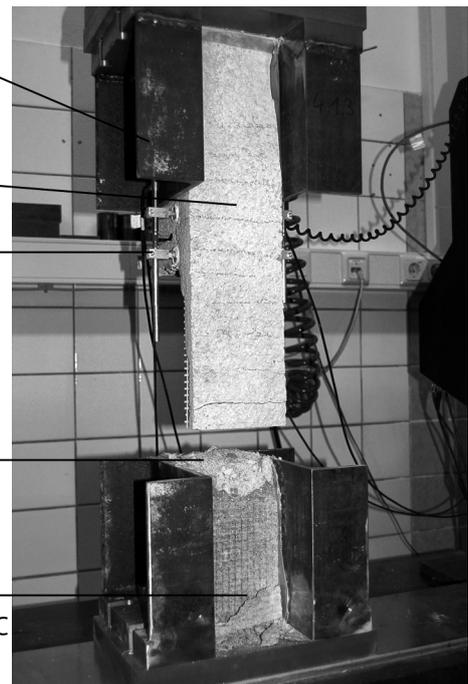


Bild 7-17: Links: Durchführung des Rissüberbrückungsversuchs. Rechts: Bruchbild – Zunächst trat der Bruch im Altbeton auf, dann folgte das Versagen in der Verbundebene Textil/SPCC

Bild 7-18, rechts, verdeutlicht, dass eine zyklische Belastung der textilbewehrten Spritzmörtelschichten über die Rissbewegungen im Betonkörper möglich ist. Hierzu wurde der Riss im Altbeton zunächst bis 0,7 mm geöffnet und danach wieder bis zu einer Rissbreite von 0,1 mm geschlossen. Dieser Vorgang wurde 55-mal wiederholt, dann erfolgte die Öffnung des Risses bis zum Versagen des Probekörpers. Nach 55 Zyklen war keine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit der Instandsetzungssys-

teme messbar. Selbst nach 200 Zyklen war die mit AR-Glas 41-521 bewehrte Probe noch intakt.

Das Lastniveau der carbonbewehrten Spritzmörtelschicht ist bei einer Rissöffnung von 0,7 mm zwar niedriger als das der EP-AR-Glasbewehrten Spritzmörtelschicht, aber beide Materialien erfüllen ihre Aufgabe und die Bruchlasten liegen auf gleichem Niveau (Bild 7–18, rechts). Die Bruchlasten mit etwa 17 kN sind mit den Ergebnissen aus den Zugversuchen (Bild 7–16, links) vergleichbar.

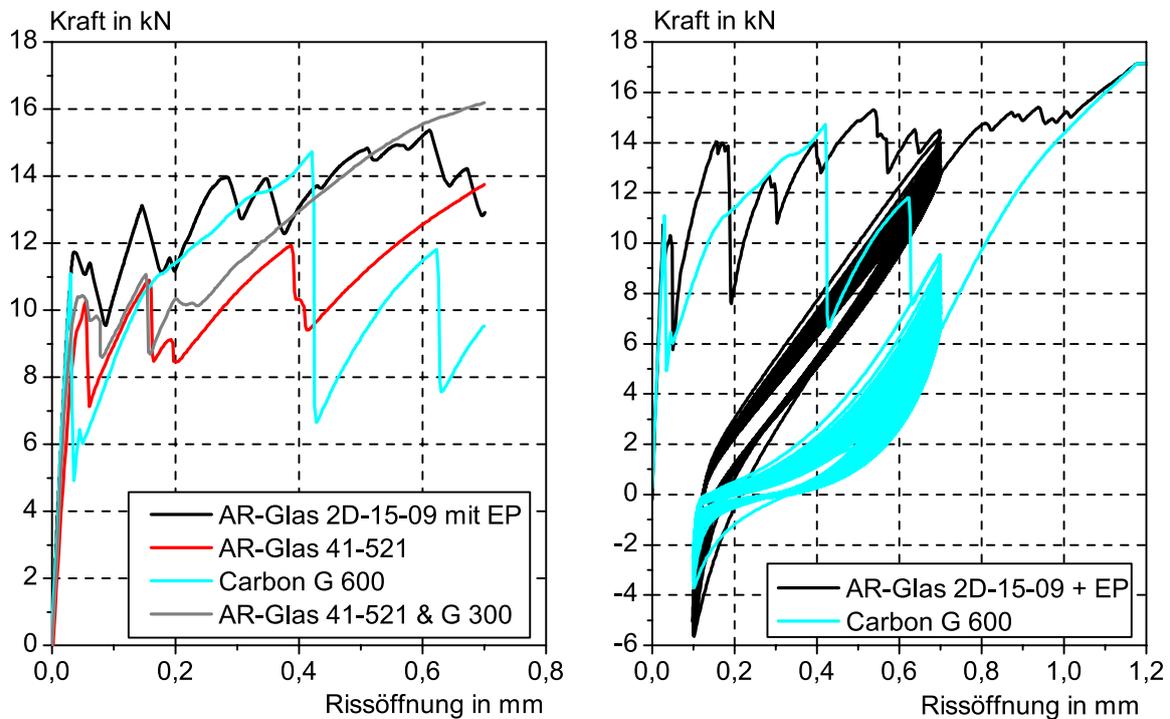


Bild 7–18: Links: Kräfte in der textilbewehrten Spritzmörtelschicht während der Rissöffnung des Altbetons bis zu einer Rissbreite von 0,7 mm. Rechts: Zyklische Beanspruchung der Rissüberbrückungskörper mit 55 Zyklen, Rissöffnung zwischen 0,1 und 0,7 mm

UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE - HAFTZUGFESTIGKEITEN

Die am Rissüberbrückungskörper nach der Prüfung ermittelten Haftzugfestigkeiten ergaben stets ein Versagen im Altbeton. Das Kohäsionsversagen im Altbeton trat bei rund $0,5 \text{ N/mm}^2$ auf. Die Prüfung des Adhäsionsversagens zwischen Spritzmörtel und Textil ergab Werte oberhalb von $1,5 \text{ N/mm}^2$. Damit wird bei Altbetonen der Klasse A3 der Verbund zwischen Untergrund und Spritzmörtel die schwächste Stelle bleiben. Die Textilien bedingen somit keine Beeinflussung des Verbundes der Instandsetzungssysteme.

ERPROBUNG AM WEHR HORKHEIM

Das Wehr Horkheim, erbaut 1927 bis 1929 vom Architekten Paul Bonatz, trennt die Schifffahrtsstraße vom Altarm des Neckars. Die Anlage besteht aus drei Wehrfeldern mit vier massiven Wehrpfeilern. In den auf den Wehrpfeilern angeordneten Windwerkhäusern befinden sich die zweistufigen offenen Stirnradgetriebe, die die Tore entsprechend dem Wasserstand betreiben. Die Wehrpfeiler weisen zahlreiche Risse und offene Arbeitsfugen auf. Die Rissbreiten liegen zwischen 0,1 und etwa 3,0 mm.

Zur umfassenden Erprobung des neuen Verbundwerkstoffes wurden acht Probeflächen am Wehr

Horkheim angelegt. Sieben Flächen befinden sich an einem Wehrpfeiler (Bild 7–19) im Bereich des Oberwassers, die achte Fläche ist unterwasserseitig im Bereich der Wasserwechselzone angeordnet. Die Gesamtfläche beträgt knapp 50 m². Tab. 7–5 gibt eine Übersicht über die Untersuchungsparameter in den einzelnen Flächen. Als Spritzmörtel wurde der gleiche S-A3-Mörtel wie in den Labo-untersuchungen verwendet. Nach der Untergrundvorbehandlung durch Hochdruckwasserstrahlen wurden vor dem Auftrag des Instandsetzungssystems ausschließlich die offenen Arbeitsfugen mit einem Klebeband mit einer Breite von 10 cm abgeklebt, um analog zum Rissüberbrückungsversuch die freie Dehnlänge des Instandsetzungssystems lokal zu erhöhen. Auf diese Abklebung wurde in den Flächen 2 und 3 verzichtet. Mit Ausnahme von Fläche 5 wurde je Fläche Textil in zwei Ebenen mit drei Spritzvorgängen eingebettet. Bei Fläche 5 befinden sich in der zweiten Textilebene zwei Textilien. Alle Flächen sind von ihrer Exposition her als frei bewittertes Außenbauteil einzustufen. Die Flächen 7 und 8 zeichnen sich durch ihre andere Position aus. Beide Flächen sind im Gegensatz zur Stirnseite nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Fläche 8 wird zudem bei Hochwasser direkt mit Wasser beaufschlagt.

Zur Erfassung der Rissbewegungen wurden Wegaufnehmer sowohl außerhalb als auch innerhalb der Probeflächen aufgebracht. Die Wegaufnehmer innerhalb der Probeflächen sind durch Schaumstoffringe vom Spritzmörtel entkoppelt worden. Über Dehnungsmessstreifen (DMS) werden die Bewegungen im Instandsetzungssystem in Höhe der Textilien ermitteln. Die Daten werden kontinuierlich erfasst und über Modem zur Auswertung ins ibac übertragen. Der Ausgangswert aller DMS wurde zu Beginn der Messungen im September 2010 auf Null gesetzt. Die Messungen begannen einige Stunden nach Fertigstellung der Probeflächen. Infolge des ersten Schwindens stiegen die Dehnungen um rund 0,1 bis 0,2 mm/m. Diese Dehnungen gingen zum Teil innerhalb der ersten Monate wieder zurück.

Tab. 7–5: Instrumentierung der Probeflächen am Wehr

Fläche	Textil (2lagig)	Sensoren
1	G 600	DMS über Riss an den Textillagen & außerhalb des Risses, Temperatur
2	G 600 ohne Klebeband	DMS über Riss an den Textillagen & außerhalb des Risses
3	Ohne	DMS über Riss
4	2D-15-09+EP	DMS über Riss an der inneren (ersten) Textillage
5	41-521 (3lagig)	
6	41-521+G 300	
7	G 600	DMS über Riss an den Textillagen & außerhalb des Risses, Temperatur
8	G 600	keine

Die Fixierung der Textilien erfolgte über Glasfaserdübel mit Edelstahltellern. Im Allgemeinen genügte die Textilbefestigung an der Oberkante mit zwei Dübeln, ggf. eine weitere im Überlappungsbereich von Textilien. Bild 7–20 zeigt exemplarisch die Textilbefestigung mittels Dübel und die gute Durchdringung des Textils mit Spritzmörtel am Beispiel des epoxidharzgetränkten Textils.

Hinsichtlich der Verarbeitung am Bauwerk hat sich das Carbontextil G 600 als am einfachsten handhabbar herausgestellt. Es bedingte weniger Rückprall als das steifere epoxidharzgetränkte Textil und ist gleichzeitig formstabiler als das AR-Glastextil 41-521.

Insgesamt konnte in 1,5 Tagen die Probefläche von 50 m² mit textilbewehrten Spritzmörteln erfolgreich instandgesetzt werden. Einen hohen Zeitaufwand bedingte hierbei das Verlegen der Sensoren und die Vielfalt der eingesetzten Textilien. Beide Aspekte würden bei normalen Instandsetzungsmaß-

nahmen entfallen. Bild 7–21 zeigt Ausschnitte der fertig gestellten Fläche, die nach dem ersten Winter, also nach rund 6 Monaten fotografiert wurden.

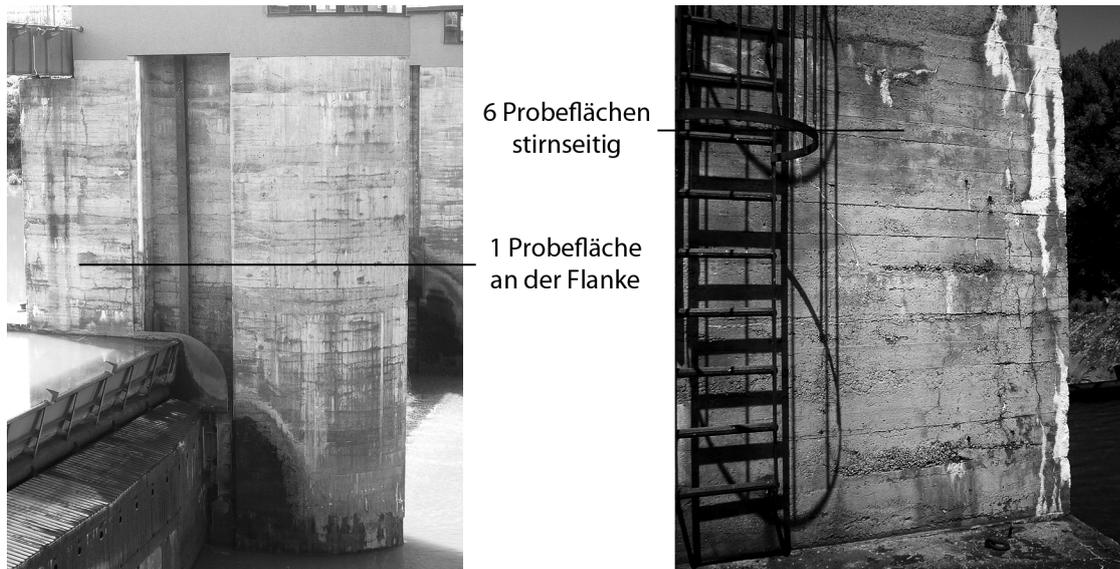


Bild 7–19: Wehrpfeiler 3 des Wehrs Horkheim. Links: Ansicht der Flanke. Rechts: Ausschnitt Stirnseite

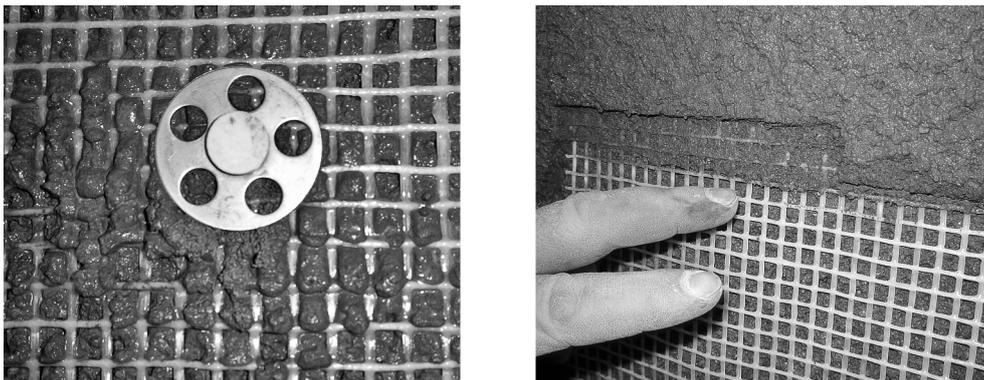


Bild 7–20: Textilbefestigung und Textildurchdringung

Visuell wurde bei der Ortsbegehung im Frühjahr 2011, nach 6monatiger Freibewitterung, keine Veränderung der Spritzmörteloberfläche festgestellt, die auf Rissbewegungen im Altbeton schließen lassen. Der Betrachtungsabstand begrenzte jedoch die Möglichkeit, Risse im Bereich von rund 0,1 mm zu detektieren.

Bild 7–22 zeigt einen Ausschnitt aus den am Bauwerk ermittelten DMS-Daten. Dargestellt sind die Daten von Sensoren, die sich unterhalb der ersten (inneren) Textillage, also in der ersten Spritzmörtelschicht in einem Abstand von rund 10 mm vom Altbeton, befinden. Der Temperaturverlauf in dieser Schicht wird in Fläche 1 gemessen. Ein DMS befand sich im ungerissenen Bereich. Dieser DMS zeigt keine wesentlichen Dehnungen während des betrachteten Zeitraums zur Jahreswende 2010/2011. Die DMS in Fläche 3 und 5, die sich oberhalb eines Risse befinden, weisen hingegen am 26.12.2010 maximale Dehnungen von rund 1,5 mm/m auf. Die Temperatur hat zu diesem Zeitpunkt ihren Minimalwert von -7 °C erreicht. Die Untersuchungen am Wehr Horkheim werden fortgeführt.

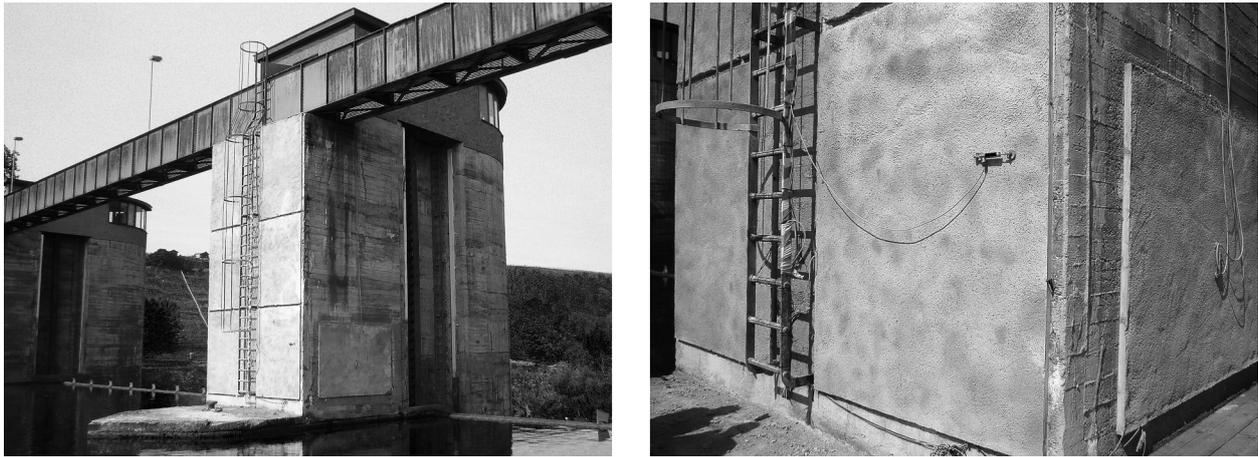


Bild 7–21: Durchgeführte Probeinstandsetzung nach dem ersten Winter

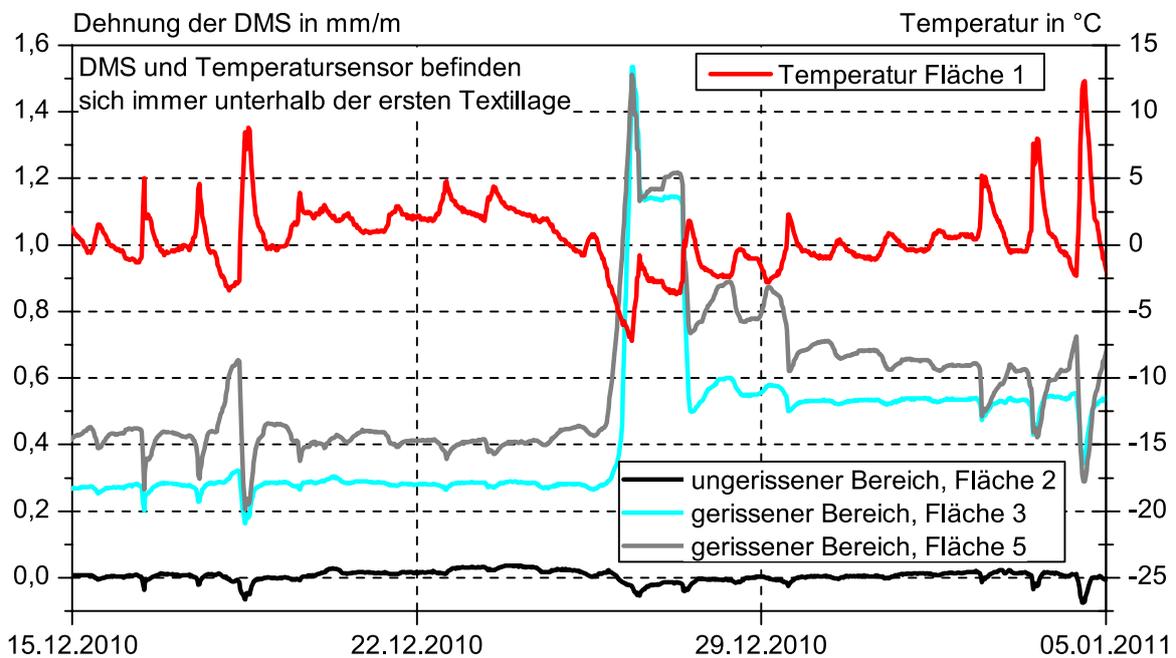


Bild 7–22: Dehnungen der DMS unterhalb der ersten Textilage zur Jahreswende 2010/2011

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von Laboruntersuchungen wurde gezeigt, dass nach ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, zugelassene Spritzmörtel problemlos mit Textilien bewehrt werden können. Ein ausreichender Verbund zwischen Textilien und Spritzmörtel konnte nachgewiesen werden.

Ferner wurde gezeigt, dass die Rissbewegungen eines Untergrundrisses durch Textilbewehrung auf mehrere feinere Risse im bewehrten Instandsetzungsmörtel verteilt werden können. Die Textilien mit epoxidharzgetränktem AR-Glas haben sich hierbei im Labor als am Besten geeignet erwiesen. Hinsichtlich der Anwendung hat allerdings das Carbondtextil G 600 den Vorteil der unmittelbaren Verfügbarkeit am Markt und der besseren Handhabbarkeit im Trockenspritzverfahren.

Die Applizierbarkeit textilbewehrter Spritzmörtelschichten unter Baustellenbedingungen an einem Bauwerk wurde am Wehr Horkheim erfolgreich gezeigt. Risse im Spritzmörtel waren bei einer visuellen Begutachtung etwa 6 Monate nach der Applikation noch nicht zu detektieren. Die DMS zeigen jedoch die Bewegung einiger Altbetonrisse. Die Fortführung der Untersuchungen werden Aussagen zur Funktionalität des neuen Instandsetzungssystems am Bauwerk ermöglichen.

Ferner sind im Rahmen eines beantragten und kürzlich bewilligten Forschungsvorhabens weitere Untersuchungen sowohl im Labor als auch an anderen Bauwerken mit geringerfesten Untergründen geplant. Im Vordergrund dieser geplanten Untersuchungen stehen die Erprobung neuer Materialien, die Verbesserung der gezielten lokalen Verbundstörung im Bereich der Risse und, ganz wesentlich, die zusätzliche Sicherstellung des Verbundes zwischen Altbeton und Spritzmörtel durch Anker.

7.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die zwei in diesem Abschnitt vorgestellten unterschiedlichen Oberflächenschutzsysteme verdeutlichen, dass auf Basis individueller Problemstellungen in der Bauwerksinstandsetzung bedarfsgerechte Instandsetzungsmethoden entwickelt werden können. Sicherlich erfordert dies umfangreiche Untersuchungen und den Willen einer fortlaufenden Verbesserung, aber es bietet am Markt auch die Alleinstellung und Kompetenz im Bereich problemorientierter, dauerhafter Instandsetzungen. Dieses große, noch schlummernde Potential wird hoffentlich in den kommenden Jahren mit dem steigenden Bedarf an objektorientierten Instandsetzungen zunehmend genutzt.

8. SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DER VORLIEGENDEN ARBEIT UND AUSBLICK

Die Lebensdauer von Betonbauwerken kann durch Oberflächenschutzsysteme um Jahrzehnte gesteigert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Dauerhaftigkeit dieser Oberflächenschutzsysteme umfassend analysiert. Hierbei ist zunächst die Breite dieses Themas zu erfassen. Die Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen für die Erhaltung von Betonbauwerken hängt ab von

- den Einwirkungen (einerseits von außen, andererseits vom Betonuntergrund),
- der Adhäsion zum Betonuntergrund (diese ist wiederum abhängig von der Betonoberflächenvorbereitung, Betonfeuchte, Betonzusammensetzung, dem Beschichtungsmaterial und der Witterung während der Applikation),
- den Beschichtungsmaterialien (Siliziumorganische Verbindungen, Polymerdispersionen, Epoxidharze, Polyurethane, Acrylate, zementgebundene Systeme und/oder Glas),
- der Materialverarbeitung am Bauwerk (Mischungsverhältnisse, Gesteinskörnung des Quarzsandes beim Abstreuen, Zeitabstände zwischen der Applikation einzelner Schichten, Witterung, Nachbehandlung etc.)
- dem Aufbau der Oberflächenschutzsysteme (15 verschiedene Varianten werden im Rahmen der Arbeit betrachtet) und
- den Schichtdicken der einzelnen Lagen in den Oberflächenschutzsystemen bzw. der Eindringtiefe bei Hydrophobierungen. Über die Schichtdicken/Eindringtiefen werden die Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten, der Verschleiß und ggf. die Rissüberbrückungsfähigkeit unmittelbar gesteuert.

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen auf Betonen stehen Bewitterungskammern zur Verfügung. In diesen können Temperaturen, relative Luftfeuchten, UV- bzw. Global-Strahlung sowie Niederschläge inklusive Nebel in zeitprogrammierten Rampen und Abfolgen aufgebracht werden.

Im Laufe der Jahre haben sich eine Vielzahl an Prüfverfahren für die Analyse von Oberflächenschutzsystemen etabliert. Es gibt Prüfverfahren mit Medienbeanspruchung (kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfdiffusion, Diffusion von Lösungen durch die Systeme), Prüfverfahren mit mechanischer Beanspruchung (Zugversuche am Beschichtungsmaterial, Haftzugversuche und Rissüberbrückungsversuche an Verbundkörpern, Gitterschnitt, Verschleißuntersuchungen), chemische Analysemethoden (Dynamische Differentialkalorimetrie, Ultraschallreflexionsverfahren, FTIR-Spektroskopie) und die visuelle Materialanalyse inklusive der Schichtdickenbestimmung im Probenquerschnitt mittels Mikroskop.

Allen gemein sind jedoch zwei erhebliche Defizite hinsichtlich der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen:

- Die Methoden sind zur Erfassung sukzessive ablaufender Veränderungen in den polymeren Schichten nicht ausreichend sensitiv.
- Es sind zerstörende Prüfungen.

Die geringe Sensitivität erfordert große Zeitintervalle zwischen den Messungen um überhaupt Veränderungen zu detektieren. Aufgrund der zerstörenden Prüfmethodik können die Messungen zudem niemals an der gleichen Stelle wiederholt werden, was vor dem Hintergrund der üblicherweise limitierten Probenanzahl kritisch zu bewerten ist.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Bereitstellung einer neuen zerstörungsfreien Prüfmethode zur Analyse von Dauerhaftigkeitsaspekten bei Oberflächenschutzsystemen, welche die vorher genannten Defizite nicht mehr aufweist. Diese neue Prüfmethode beruht auf der NMR-MOUSE als Mess-Sensor. Die NMR-MOUSE (Nuclear Magnetic Resonance - Mobile Universal Surface Explorer) wurde am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen University entwickelt. Mit dem Sensor werden Wasserstoff-Isotope innerhalb eines Messvolumens (z. B. 20 mm x 20 mm x 30 µm Dicke) angeregt. Die Erfassung des freien Induktionszerfalls der angeregten Wasserstoff-Isotope erfolgt anhand von Echoverfahren mit CPMG-Impulsfolge (nach Carr-Purcell-Meiboom-Gill). Die ausführliche Erläuterung des Messprinzips und der Datenanalyse befindet sich in Abschnitt 4.1.

Neben der Tatsache, dass zerstörungsfrei gemessen wird, kann das Messvolumen mit seinen Messdicken zwischen 10 bis 200 µm bis zu einer Tiefe von 25 mm in der Probe verfahren werden. Mit dieser neuen zerstörungsfreien Prüfmethode können

- die einzelnen Schichtdicken mehrlagiger Oberflächenschutzsysteme bestimmt werden. Im Abschnitt 4.5 wurde die gute Übereinstimmung der Schichtdickenberechnung anhand NMR-Tiefenprofile und der Schichtdickenbestimmung mittels Mikroskop für verschiedene Oberflächenschutzsysteme gezeigt. Bei entsprechend gleichmäßig aufgetragenen Schichten und deutlich unterschiedlichen Wasserstoffgehalten in den einzelnen Schichten sind Schichtdicken von 50 µm mit einer Standardabweichung von weniger als 5 µm messbar.
- Eindringtiefen, Wirkstoffverteilungen und Wirksamkeiten von Hydrophobierungen in Betonoberflächen erfasst werden (Abschnitt 5.2.2). Bis zum Abschluss der chemischen Reaktionen der auf die Betonoberflächen applizierten Hydrophobierungen erfolgt eine zeitabhängige Umverteilung des Wirkstoffs. Dies kann ebenso wie die Eindringtiefe durch wiederholte Messungen an gleichen Messpositionen mit der Prüfmethode aufgezeigt werden. Nach Abschluss der chemischen Reaktionen kann die Wirksamkeit der hydrophobierten Betonoberfläche indirekt über die tiefenabhängige Bestimmung der Wasserverteilung im Beton ermittelt werden. Mit dieser indirekten Methode wird aktuell gezeigt, dass die Karbonatisierung hydrophobierter Betonoberflächen bei einigen Produkten einen höheren Wassergehalt innerhalb des hydrophobierten Bereiches (also eine Abnahme der Wirksamkeit) bedingen kann.
- Materialveränderungen in Polymerdispersionen über die Veränderung der Relaxationszeit T_2 erfasst werden (Abschnitt 5.3). Es wurde gezeigt, dass der Anstieg des E-Moduls der Polymerdispersionen in einer linearen Beziehung zur Abnahme der Relaxationszeit T_2 steht. Bei den untersuchten Acrylatdispersionen kommt es infolge mehrjähriger Freibewitterung aber auch Laborbewitterungen zum Anstieg der E-Moduli.
- über die drei gezeigten Aspekte hinaus Veränderungen im Wassergehalt der Betonoberfläche nachgewiesen werden. So ist einerseits prüfbar, ob der Beton durch das applizierte Oberflächenschutzsystem austrocknet, andererseits ist messbar, ob das Oberflächenschutzsystem den Beton dauerhaft

gegenüber Feuchteinwirkungen abdichtet.

Beim Einsatz der NMR-MOUSE zur Untersuchung von Oberflächenschutzsystemen auf Betonbauwerken sind Einflüsse aus Stahlbewehrung, Temperaturgradienten und Ausrichtung des Sensors zum Messpunkt zu beachten (Abschnitt 4.2 bis 4.4). In Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, dass sich das gemessene Tiefenprofil in Abhängigkeit von der Menge und der Lage der Stahlbewehrung im Beton verschiebt, während die Signalintensität ansteigt. Die gemessenen Schichtdicken werden hingegen nicht von der Bewehrung beeinflusst. Weiterhin wurde eine auf der Baustelle anwendbare Methode aufgezeigt, um die Profilverschiebung infolge Bewehrung zu erfassen und zu korrigieren: Ein auf der Bauwerksoberfläche angebrachter Marker dient als rechnerischer Nullpunkt auf den sich das weitere Profil bezieht. Da die Signalintensitäten in einem Tiefenprofil infolge der Bewehrung immer um den gleichen Betrag verändert werden, sind vergleichende Aussagen von der Bewehrung unabhängig. Sollen die Signalintensitäten von Tiefenprofilen an unterschiedlichen Bauwerkspositionen ermittelt und miteinander verglichen werden, so ist darauf zu achten, dass die Position der Bewehrung zum Messfeld nicht verändert wird. Sind absolute Werte erforderlich, ist dies ebenfalls möglich. Hierzu sind die relevanten Bewehrungsanordnungen im Labor zu untersuchen und objekt- sowie messspezifische Korrekturgleichungen zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der nicht befahrbaren Oberflächenschutzsysteme wurden Langzeituntersuchungen an hydrophobierten Betonoberflächen, Polymerdispersionen und Dichtungsschlämmen projektübergreifend ausgewertet (Kapitel 5). Die Wirksamkeit hydrophobierter, im Vorfeld karbonatisierter Betone ist bei Auftragsmengen $\geq 200 \text{ g/m}^2$ und Wirkstoffgehalten $\geq 40 \%$ sowohl nach einer einjährigen Freibewitterung als auch nach einer mehrparametrischen Laborbewitterung unverändert. Eine Reduktion der Auftragsmenge und/oder des Wirkstoffgehaltes bedingt hingegen bei den gleichen Bewitterungsbedingungen einen Verlust an Wirksamkeit. Anhand der Bestimmung der Wasseraufnahme wurde gezeigt, dass infolge einer Karbonatisierung hydrophobierter Betone die Wirksamkeit einiger Hydrophobierungen nachlässt. Um Veränderungen innerhalb der hydrophoben Betonschicht frühzeitig detektieren zu können, ist eine sensitivere Untersuchungsmethode erforderlich. Die entwickelte indirekte Methode über die fein aufgelöste, tiefenabhängige Bestimmung der Protonen des Wasserstoffs mit der NMR-MOUSE erfüllt nun diese Forderung. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsvorhabens wird aktuell die Dauerhaftigkeit hydrophobierter Betonoberflächen mittels der neuen NMR-Prüfmethode untersucht.

Die Untersuchungen an Polymerdispersionen vor, während und nach unterschiedlichen Frei- sowie Laborbewitterungen verdeutlichen, dass sich Materialveränderungen infolge Bewitterungen mit den üblichen Prüfmethode wie Gitterschnitt, Haftzugfestigkeiten und Schichtdicken nicht detektieren lassen. Zugversuche an Freien Filmen und Messungen mit der NMR-MOUSE zeigen jedoch eindeutig eine Zunahme der Materialsteifigkeiten infolge Bewitterung. Dieses Ergebnis wurde auch anhand von Zugversuchen an beschichteten Rissüberbrückungsprismen ermittelt: Die Rissüberbrückungsfähigkeit infolge Bewitterung nahm ab. Aufgrund der geringen Probenanzahl und Streuungen in den bis zu 12 Jahre ausgelagerten Proben, ist die Aussagekraft dieser Versuche jedoch auf die Feststellung von Tendenzen beschränkt. Aktuell wird untersucht inwiefern ein oberflächennaher Abbau der Polymerdispersionen infolge Bewitterung mittels tiefenabhängiger NMR-Messungen bestimmt werden kann.

Die Zugversuche an Freien Filmen der bewitterten Dichtungsschlämmen zeigen ebenfalls eine deutliche Abnahme der maximalen Dehnungen und damit bei steigender Bruchspannung eine Zunahme der Materialversprödung. Mit zunehmender Bewitterungsdauer sinkt die maximale Dehnbarkeit des Materials. In der Tendenz spiegelt sich dieses Ergebnis auch in der Abnahme der Rissüberbrückungsfähigkeit sowie in der Entstehung von Mikrorissen an der Schlämmenoberfläche wider. Die betrachteten Schlämmen sind nach 7 bzw. 12-jähriger Freibewitterung mit den unterschiedlichen Beanspruchungen (Meer- und Süßwasser im Sprühbereich, in der Wasserwechselzone und unter Was-

ser, Industrieklima, Seeklima) vollkommen funktionstüchtig.

Bei den in Kapitel 6 betrachteten befahrbaren Oberflächenschutzsystemen stand die langfristige Haftung der Beschichtungen zum Untergrund zunächst im Vordergrund. Befahrbare Oberflächenschutzsysteme weisen eine Grundierung aus Epoxidharz auf. Schadensbilder wie Adhäsionsminderung, Adhäsionsverlust und Blasenbildungen in der Grenzfläche Beton und Grundierung bei Bauwerken haben die umfangreichen Untersuchungsreihen hinsichtlich der Haftzugfestigkeit von Grundierungen zum Beton bedingt. Ergebnis der bis zu 10 Jahre andauernden Untersuchungen mit unterschiedlichen Betonen, Betonfeuchten, Lagerungsklimaten, Epoxidharzen und Hydrophobierungen ist, dass die beschriebenen Schadensbilder im Labor nicht festgestellt wurden. Hinsichtlich der Versagensarten im Haftzugversuch ist eine Differenzierung in den Versuchsvarianten möglich. Bei der Applikation auf nassem Beton, bei einer Fussbadlagerung bei 8 °C anstelle von 23 °C und bei einem aufgrund höherer Betonporositäten erhöhten Betonwassergehalt steigt der Anteil am Adhäsionsversagen. Eine Hydrophobierung des nassen Betons vor der Applikation eines Epoxidharzes bedingt keine Erhöhung der Haftzugfestigkeiten, weder nach 1-jähriger noch nach 10-jähriger Fussbadlagerung. Infolge eines Temperaturschocks durch das Aufbringen von Bitumenschweißbahnen auf die grundierten Betonoberflächen verringern sich die Haftzugfestigkeiten nicht.

Umfangreiche Untersuchungen an Parkbauten ergaben, dass bei einer Ausführung der Oberflächenschutzsysteme gemäß Merkblättern und Richtlinie das Eindringen von Chloriden und Kohlenstoffdioxid innerhalb der betrachteten 15 Jahre minimal ist. Verringerte Schichtdicken und/oder eine mangelhafte Abstreuerung mit Quarzsand (zu große Gesteinskörnung) bedingen jedoch Undichtigkeiten im Oberflächenschutzsystem und damit ein Eindringen von Chloriden. Sowohl bei den starren Systemen als auch bei den rissüberbrückenden Systemen wurden Risse in den Oberflächenschutzsystemen festgestellt. Insbesondere in Trennrissen lagen hohe Geschwindigkeiten bei der Korrosion des Bewehrungsstahls vor. Hier kann die lokale Behandlung der Risse eine dauerhafte Instandsetzung sicherstellen. Die Untersuchungen verdeutlichen die Relevanz ausreichender Schichtdicken für die Dauerhaftigkeit von befahrbaren Oberflächenschutzsystemen. Die Überprüfung der Schichtdicken ist nun am Bauwerk mittels zerstörungsfreier Schichtdickenermittlung basierend auf der NMR-MOUSE möglich.

8

In Tab. 8–1 sind wesentliche Kernaussagen der in dieser Arbeit für Hydrophobierungen und Oberflächenschutzsysteme auf Polymerbasis ausgewerteten Langzeituntersuchungen gegenübergestellt.

Die über Jahrzehnte durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit den eingesetzten Untersuchungsmethoden an im Labormaßstab betrachteten Oberflächenschutzsystemen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit häufig nur geringfügige Veränderungen detektiert werden können. Die Praxis zeigt hingegen immer wieder die im Kapitel 3 beschriebenen Schäden. Dies wird auf zwei Ursachen zurückgeführt:

- Die bisherigen Untersuchungsmethoden sind, wie bereits geschrieben, nicht ausreichend sensitiv.
- Die Applikation der im Allgemeinen bereits zugelassenen Produkte im Labormaßstab unter Einhaltung der Verarbeitungsregeln entspricht nicht der Realität auf Baustellen. Dafür sind die applizierten Mengen zu gering, die Sorgfalt bei der Applikation zu hoch und drittens stellen die ausgewählten Produkte im Allgemeinen bereits das Beste des am Markt Verfügbaren dar (Systeme mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung).

Mit der neuen Prüfmethode basierend auf der NMR-MOUSE ist nun eine Lösung für die erstgenannte Ursache vorhanden. Zur Lösung der zweiten Ursache ist die stärkere Einbeziehung von auf Baustellen applizierten Oberflächenschutzsystemen in die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen erforderlich.

Sinnvoll wäre die Begleitung der Applikation von Oberflächenschutzsystemen auf Betontragwerken sowie die langjährige Untersuchung des Systems von Beginn an, damit die Randbedingungen der Maßnahme nachvollziehbar dokumentiert sind. Weiterhin sollten für zukünftige Forschungsvorhaben während der OS-Applikation am Bauwerk großformatige Probekörper, die am Bauwerk konditioniert wurden, durch die ausführenden Unternehmen für Laboruntersuchungen beschichtet werden.

Tab. 8-1: Kernaussagen zu den betrachteten Oberflächenschutzsystemen auf Basis von siliciumorganischen Verbindungen bzw. Polymeren

	Hydrophobierungen	Polymerdispersionen	Dichtungsschlämmen	Befahrbare Systeme	
	OS 1	OS 2 – OS 5a	OS 5b	OS 8	OS 11 a/b
Dauer*	1 a**	12 a**	12 a**	22 a	15 a
Kernaussagen	Ausreichende(r) Auftragsmenge, Eindringtiefe, Wirkstoffgehalt: kein Verlust der Wirksamkeit	Visuelle Beurteilung: Nach Reinigung ggf. lokale Schattierungen in der Oberfläche	Visuelle Beurteilung: Nach Reinigung ggf. lokale Schattierungen in der Oberfläche; ggf. feine Risse von 10-20 µm Breite	Ausreichende Schichtdicke, angepasste Abstreuung: minimaler Verschleiß	Verschleiß größer als bei OS 8
	Ausreichende Eindringtiefe erforderlich -> nicht auf feuchte Betone applizieren	Zunahme der Materialsteifigkeiten -> Rissüberbrückungsfähigkeit nimmt ab, größter Abfall in den ersten 3 Jahren, Laborbewitterung spiegelt dies wider	Materialversprödung -> Rissüberbrückungsfähigkeit nimmt ab		Zum Teil gerissen -> Lokale Behandlung der Risse erforderlich
	Veränderungen im Betongefüge (Karbonatisierung/Hydratation): Ggf. Nachlassen der Wirksamkeit	Haftung zum Untergrund: keine signifikanten Veränderungen		Haftung zum Untergrund: i. A. gut, ggf. lokale Ablösungen	
		Schichtdicken: keine signifikanten Veränderungen	Kein Eindringen von Chloriden durch das System in den Beton	Ausreichende Schichtdicke, angepasste Abstreuung: Chlorideindringen minimal	
Ausblick	Laufendes DFG-Projekt „Zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen auf Beton“	Fortführung der Freibewitterung (20 Jahres-Werte)		Abbildung des Verschleißes mit Prüfverfahren ist ungeklärt	
		Analyse ob Materialveränderungen von außen nach innen fortschreiten		Alternativ Abdichtungen mit Bitumen/Gussasphalt	

*maximale Dauer der Freibewitterung, soweit nicht anders vermerkt

**sowohl Freibewitterung als auch mehrparametrische Laborbewitterung

Die im Kapitel 7 vorgestellten neuen anorganischen Oberflächenschutzsysteme zeigen, dass die Dauerhaftigkeit des Oberflächenschutzes von Betontragwerken mit spezieller Historie/Funktion durch eine objektspezifische Systementwicklung erhöht werden kann. Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens erfolgt die Weiterentwicklung textilibewehrter Spritzmörtelschichten mit und ohne Verankerung in der bestehenden Struktur. Das große Interesse der Öffentlichkeit sowie die aktuellen Anfragen verdeutlichen die Notwendigkeit derartiger Oberflächenschutzsysteme. Hier ist als ein Bei-

spiel die Instandsetzung der Wallfahrtskirche in Neviges vom Architekten Gottfried Böhm zu nennen. Bei der Instandsetzung sollen textilbewehrte Spritzmörtel in Kombination mit einer elastischen Rissbehandlung zum Einsatz kommen.

Die Arbeit verdeutlicht, dass eine verallgemeinerte und pauschalisiert gültige Lebensdauerbemessung von Oberflächenschutzsystemen für die Erhaltung von Betontragwerken nicht zielführend ist. Vielmehr ist es erforderlich objektspezifisch langfristig wirksame Oberflächenschutzsysteme zu definieren. Soll darüber hinausgehend die Lebensdauer der am jeweiligen Objekt applizierten Oberflächenschutzsysteme quantifiziert werden, wird hierzu die wissenschaftliche Begleitung der Instandsetzungsmaßnahme von Beginn an vorgeschlagen. Hierfür ist eine sensitive, zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur großflächigen und regelmäßigen Analyse des am Bauwerk applizierten Oberflächenschutzsystems eine wesentliche Voraussetzung.

Die Quantifizierung der Lebensdauer eines objektspezifischen Oberflächenschutzsystems erfordert Erfahrung. Die hierzu notwendigen Werkzeuge sind in dieser Arbeit zusammengestellt. Die Arbeit hat jedoch auch aufgezeigt, dass neben dem zeitlichen Aufwand vor allem der Wille aller Beteiligten zur Zusammenarbeit unabdingbare Komponente des Erfolgs sind. Die in dieser Arbeit unter der Voraussetzung der richtigen Handhabung immer wieder nachgewiesene hohe Leistungsfähigkeit der polymeren Oberflächenschutzsysteme verdeutlicht einerseits das Potential der Materialien und andererseits den Umstand, dass objektspezifisch erarbeitete Lösungen langfristig wirtschaftlich sind. Dies bestätigen auch die Langzeituntersuchungen von */Bre07/* und */Schu08/*.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Oberflächenschutzsystemen ist ein bedeutender Baustein zur Erhaltung von Betonbauwerken. Unter dem Begriff Oberflächenschutzsystem werden im Allgemeinen eine Vielzahl an Typen und Aufbauten polymerhaltiger Beschichtungen zusammengefasst. Aber auch anorganische Materialien wie Mörtel und Glas können Bestandteile eines Oberflächenschutzsystems sein. Mit dem Einsatz von Oberflächenschutzsystemen können folgende wesentliche Ziele erreicht werden:

- Schutz des Betons gegen eindringende Stoffe wie z. B. Wasser, Chloride, Kohlenstoffdioxid.
- Austrocknung des Betons, indem Wasserzutritt in den Beton verhindert wird aber gleichzeitig ein Feuchtetransport aus dem Beton durch die Beschichtung möglich ist.
- Erhöhung des Widerstandes gegen Chemikalien und/oder mechanischen Angriff.

Neben diesen Zielen, die die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks betreffen, werden auch Ziele zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit verfolgt. Aus den breitgefächerten Zielen sowie den verschiedensten Aufbauten bzw. Materialkombinationen von Oberflächenschutzsystemen resultiert ein großer Anwendungsbereich und damit Verbunden ein hohes Bauvolumen für Oberflächenschutzsysteme in der Erhaltung von Betonbauwerken.

Im Umfeld der Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerken wird die Frage nach der Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen auf Stahlbetonoberflächen zunehmend präsenter. Bisher sind hierzu jedoch noch keine konkreten Angaben möglich, da Grundlagenkenntnisse zu den jeweils ablaufenden Schädigungsmechanismen fehlen. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Material- und Beanspruchungsvielfalt auch die möglichen Schädigungen weit gefächert sind. Um jedoch derartige Grundlagenkenntnisse überhaupt gewinnen zu können fehlt es an geeigneten Prüfmethode.

Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung von „Werkzeugen“ mit denen zukünftig objektspezifisch die Lebensdauer von Oberflächenschutzsystemen quantifiziert werden kann. Der „Werkzeugkoffer“ besteht zum einen aus der Bereitstellung einer sensitiven, zerstörungsfreien Prüfmethode, zum anderen aus der Aufbereitung von über Jahrzehnten am ibac erarbeiteten Versuchsdaten mit Oberflächenschutzsystemen und zum dritten aus Beispielen wie objektspezifisch, dauerhafte Oberflächenschutzsysteme erarbeitet werden können.

Zur Vermittlung der Komplexität des Themas werden Eingangs die Einwirkungen von außen und vom Betonuntergrund auf Oberflächenschutzsysteme aufgeführt. Zudem wird erläutert, dass eine ausreichende Adhäsion zwischen Betonoberfläche und Oberflächenschutzsystem essentiell für die Dauerhaftigkeit der Schutzmaßnahme ist. Typische, für Oberflächenschutzsysteme eingesetzte Polymere sind Polymerdispersionen, Epoxidharze und Polyurethane. Zudem kommen noch siliziumorganische Verbindungen für Hydrophobierungen sowie anorganische Materialien wie Mörtel und Glas hinzu.

Basierend auf diesen Grundlagen werden in der Arbeit zunächst die möglichen Schädigungsmechanismen an Oberflächenschutzsystemen erörtert. Die Schäden basieren auf chemischen, biologischen, physikalischen und/oder mechanischen Vorgängen. Ein Großteil der in der Praxis vorliegenden Schä-

den lässt sich bereits heute durch ein entsprechend sorgfältiges Arbeiten und qualitativ hochwertige Produkte vermeiden. Dazu ist insbesondere eine ausreichende Vorbereitung des Untergrundes, das Warten auf geeignete Witterung sowie neben der Beachtung von Materialkompatibilitäten eine ausreichende Materialschichtdicke notwendig.

Bisher erfolgt die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen über Frei- und künstlicher Bewitterung mit anschließender Medien- bzw. mechanischer Beanspruchung. D. h. vor, während und nach den Bewitterungen werden Haftzugfestigkeiten sowie Rissüberbrückungseigenschaften an Verbundkörpern untersucht, gegebenenfalls Verschleißuntersuchungen durchgeführt und die Dichtigkeit bzw. Diffusionsoffenheit gegenüber Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Wasser bestimmt. Neben einer visuellen Beurteilung ist zudem die Schichtdickenmessung zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Oberflächenschutzsystems essentiell. Dies erfolgt bisher an zersägten Bohrkernen unter dem Mikroskop.

Mit der NMR-MOUSE (Nuclear Magnetic Resonance - Mobile Universal Surface Explorer), die am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen als unilaterale NMR entwickelt wurde, steht erstmals ein viel versprechendes Messverfahren zur sensitiven, zerstörungsfreien Untersuchung von Oberflächenschutzsystemen zur Verfügung. Mit diesem Messverfahren wurden am ibac Methoden entwickelt, um zerstörungsfrei

- Schichtdicken von Oberflächenschutzsystemen,
- Materialveränderungen in Polymeren sowie
- das Eindringen, die Verteilung und den Transport von Wasser und anderen Flüssigkeiten mit Protonen

zu untersuchen. Im Rahmen der Methodenentwicklung erfolgte auch das Studium der Einflüsse aus Betonstahlbewehrung, Temperaturänderungen und Probenausrichtung. Erstmals wurde in umfangreichen Versuchsreihen gezeigt, wie bei der Bestimmung des Aufbaus und der Schichtdicken von Beschichtungen auf Stahlbetonbauwerken mit der NMR-MOUSE der Einfluss der Stahlbewehrung auf die Messergebnisse zu berücksichtigen ist: Das gemessene Tiefenprofil verschiebt sich in Abhängigkeit von der Menge und der Lage der Stahlbewehrung im Beton während die Signalintensität ansteigt. Die gemessenen Schichtdicken werden hingegen nicht von der Bewehrung beeinflusst. Es wurde eine auch auf der Baustelle anwendbare Methode aufgezeigt, um die Profilverschiebung infolge Bewehrung zu erfassen und zu korrigieren: Ein auf der Beschichtungsoberfläche aufgebracht Marker dient als rechnerischer Nullpunkt auf den sich das weitere Profil bezieht.

In der Arbeit werden Langzeituntersuchungen an Oberflächenschutzsystemen, die am ibac in den letzten zwei Jahrzehnten erfolgten, erläutert und deren Ergebnisse aufbereitet. Die dabei betrachteten Oberflächenschutzsysteme basieren im Wesentlichen auf Hydrophobierungen, Polymerdispersionen, Dichtungsschlämmen und Epoxidharzen. Sofern die Proben noch vorhanden waren, erfolgte auch die nachträgliche Untersuchung der bewitterten Materialien mittels NMR-MOUSE. Bei den Hydrophobierungen wurden Indizien für eine Abnahme der Wirksamkeit infolge der Veränderung der Betonstruktur durch Hydratation oder Karbonatisierung aufgezeigt. Weiterhin ist mit der NMR-MOUSE das Eindringen und die Wirkstoffverteilung von Hydrophobierungen im Beton zeit- und tiefenaufgelöst darstellbar. Über die Bestimmung der Wasserstoff-Isotope mittels NMR-MOUSE kann bei wassergesättigten Betonen indirekt auch nach Abschluss der chemischen Reaktionen applizierter Hydrophobierungen auf die Wirtiefe und Veränderungen in der Wirksamkeit infolge Bewitterungen geschlussfolgert werden.

Freie Filme aus Polymerdispersionen und Dichtungsschlämmen sowie mit den gleichen Materialien beschichtete Betonplatten wurden an verschiedenen Orten bis zu 12 Jahre freibewittert und im Labor

künstlich gealtert. Die Auswertung aller während der Bewitterungen durchgeführten Untersuchungen zeigt keine Abnahme der Haftzugfestigkeiten, aber eine Zunahme der Materialsteifigkeiten. Der Anstieg der Materialsteifigkeiten kann nun erstmals zerstörungsfrei mit dem NMR-Prüfverfahren detektiert werden.

Selbst bei den analysierten befahrbaren Oberflächenschutzsystemen ist die Haftung zum Betonuntergrund, ermittelt anhand von Haftzugfestigkeiten, kein kritischer Versagensmechanismus. Vielmehr liegt die Schwachstelle von Oberflächenschutzsystemen in besonders beanspruchten Bauwerken wie Parkbauten im Auftreten von Rissen. Sogar rissüberbrückende Oberflächenschutzsysteme wie das OS 11 sind bei den untersuchten Parkbauten nicht rissfrei. Außerhalb der lokalen Risse weisen auf Epoxidharz basierende Oberflächenschutzsysteme mit ausreichender Schichtdicke auch nach über 15 Jahren Beanspruchung in Parkbauten noch ihre Funktionstüchtigkeit auf.

Alle auch über Jahrzehnte durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit den eingesetzten Untersuchungsmethoden an im Labormaßstab betrachteten Oberflächenschutzsystemen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit nur geringfügige Veränderungen detektierbar sind. Dies wird auf zwei Ursachen zurückgeführt: Die bisherigen Untersuchungsmethoden sind nicht ausreichend sensitiv und die Applikation der im Allgemeinen bereits zugelassenen Produkte im Labormaßstab unter Einhaltung der Verarbeitungsregeln entspricht nicht der Realität auf Baustellen.

Die NMR-Prüfmethode bietet nun eine Lösung für die genannte erste Ursache. Zum einen kann mit dem Sensor über die Relaxationszeit auf Veränderungen in Polymerschichten geschlossen werden, zum anderen können über die Amplitude Veränderungen in den Schichtdicken sowie das Eindringen von siliziumorganischen Verbindungen, Wasser und Chloridlösungen detektiert werden. Damit ist die tiefenabhängige Ermittlung von Veränderungen in der Materialsteifigkeit und Materialstruktur möglich. Wiederholte, zerstörungsfreie Messungen an gleich bleibenden Messstellen sowie die Betrachtung nahezu beliebig vieler Messstellen erhöhen zudem die Aussagekraft der Untersuchungen. Im Rahmen aktueller und zukünftiger Forschungsvorhaben wird einerseits die Leistungsfähigkeit der Messmethode weiterentwickelt, andererseits wird die Anwendung an Bauwerken forciert. Gerade durch den Einsatz dieser Methode in der Praxis und der dadurch entstehenden Datenbasis, wird von einer zunehmenden Sensibilisierung hinsichtlich der Relevanz der Applikationsausführung ausgegangen. Hierdurch rückt die Lösung der zweiten, oben genannten Problematik näher.

Mit der Entwicklung textilbewehrter Spritzmörtel in Kombination mit einer lokalen Rissbehandlung wird gezeigt, dass auch objektspezifische Lösungen ein Schlüssel zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit zukünftiger Schutzmaßnahmen sind. Mittels textiler Bewehrung im Spritzmörtel können Bewegungen aus dem Untergrund in ein feinverteiltes Rissbild transferiert werden. Sind die Rissbreiten ausreichend fein, so ist mit dem zusintern der Risse eine quasi dichte Oberfläche erreichbar.

Schlussendlich repräsentiert der vorgestellte „Werkzeugkoffer“, bestehend aus

- der systematischen Analyse bestehender Oberflächenschutzsysteme,
- der zerstörungsfreien NMR-Prüfmethode sowie
- der Vorstellung und Fokussierung objektspezifischer Instandsetzungskonzepte mit Unterstützung durch wissenschaftliche Arbeitsmethoden,

eine fundierte Basis für die zukünftige Umsetzung von dauerhaften und wirtschaftlich erfolgreichen Betonbauwerksinstandsetzungen.

10. SCHRIFTENVERZEICHNIS

10.1 LITERATUR

- /ACT11/ <http://www.act-aachen.com>
- /Ado02/ Adolph, G.; Nagorny, U.; Schulte, H.-G.; Höfer, R.: Auf die Zutat kommt es an: Additive für lösemittelfreie Beschichtungen im Baubereich. In: Farbe und Lack 108 (2002), Nr. 5, S. 103–109
- /Ali97/ Alig, I.; Lellinger, D.; Sulima, J.; Tadjbakhsch, S.: Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of the viscoelastic properties of polymer films. Rev. Sci. Instr. 68 (1997) 1536
- /Ali00/ Alig, I.; Lellinger, D.: Ultrasonic methods for characterizing polymeric materials. Chemical Innovation (2000) (2), 13
- /Ali03/ Alig, I.; Tadjbach, S.; Lellinger, D.; Oehler, H.; Wenzel, M.: Ultraschallverfahren zur Verfolgung von Trocknung und Verfestigung von Lacken und Klebstoffen. Farbe & Lack 109 (2003) 76
- /Ali07/ Alig, I.; Oehler, H.; Lellinger, D.; Tadjbach, S.: Monitoring of film formation, curing and ageing of coatings by an ultrasonic reflection method. Progress in Organic Coatings 58 200–208 (2007).
- /Ant09/ Antons, U.; Orłowsky, J.; Raupach, M.: Ergebnisse einer 12-jährigen Auslagerung von Oberflächenschutzsystemen an verschiedenen Standorten. In: Restoration of Buildings and Monuments 15 (2009), Nr. 5, S. 343-354 ISSN 1864-7251
- /Ant12/ Antons, U.; Orłowsky, J.; Raupach, M.: A non-destructive test method for the performance of hydrophobic treatments. Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa, September 2012
- /BDZ04/ Bundesverband der Deutschen Zementindustrie; Bayer, E.; Bose, T.; Kampen, R.; Klose, N.: Betonbauwerke in Abwasseranlagen. 4. Aufl. Düsseldorf: Beton-Verlag. - Schriftenreihe der Bauberatung Zement (1992) ; 2004
- /Bed09/ Beddoe, R.E.; Hilbig, H.: Modelling the Evolution of Damage to Concrete by Acid Attack. Göttingen: Cuvillier, 2009. - In: Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials. Final Report on Priority Program 1122 Funded by the German Research Foundation DFG, (Franke, L.; Deckelmann, G.; Espinosa-Marzal, R. (Eds.)), S. 275-292
- /Ben03/ Benedix, R.: Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure. 2. Aufl. Stuttgart: Teubner, 2003

- /Bis83/ Bischof, C.; Possart, W.: Adhäsion: Theoretische und Experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie-Verlag, 1983
- /Blu05a/ Blümich, B.: Essential NMR. Berlin: Springer, 2005.
- /Blu05b/ Blümich, B.; Casanova, F.; Perlo, J.; Anferova, S.; Anferov, V.; Kremer, K.; Goga, N.; Kupferschläger, K.; Adams, M.: Advances of Unilateral Mobile NMR in Nondestructive Materials Testing. *Magnetic Resonance Imaging* 23, 197-201 (2005)
- /Blu08a/ Blümich B. The Incredible Shrinking Scanner. *Scientific American*. November 2008. p. 68-73.
- /Blu08b/ Blümich B. Casanova F. Perlo J. Mobile Single-Sided NMR. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 52. Nr. 4; 2008. p. 197-269.
- /Bod08/ Bode, K.A.; Dimmig-Osburg, A.: Untersuchungen zur Lastabtragung im Gefüge von PCC. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2008. - In: Verkehrsbauten Schwerpunkt Parkhäuser/Brücken. 3. Kolloquium, Ostfildern, 29. und 30. Januar 2008, (Gieler-Breßmer, S. (Ed.)), S. 299-307
- /Bod11/ Bode, K.A.; Hofmann, A.; Dimmig-Osburg, A.: Zum Einfluss alkalireaktiver Gesteinskörnungen auf die Blasenbildung polymerer Beschichtungen auf Beton. In: *Bausubstanz* 2 (2011), Nr. 2, S. 46-5
- /Bor05/ Bornemann, R.; Lemmer, U.; Walk-Laufer, B.; Raupach, M.: Bestimmung der Polymerverteilung in Textilbewehrtem Beton mittels konfokaler Raman-Mikroskopie. In: *Photonik* 37 (2005), Nr. 4, S. 60-63
- /Bra87/ Braun, E.: Bitumen: Anwendungsbezogene Baustoffkunde für Dach- und Bauwerksabdichtungen. Köln: R. Müller, 1987
- /Bra06/ Brameshuber, W.: Textile Reinforced Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, (Brameshuber, W. (Ed.)), Report 36, Bagnex: RILEM, 2006
- /Bra07/ Brameshuber, W.; Mott, R.: Nachträgliche Abdichtung von Gebäuden mit Textilbeton - Konzeption und erste Erfahrungen. In: *BFT International* 73 (2007), Nr. 2, S. 146-147. ISSN 0373-4331
- /Bra10a/ Brameshuber, W.: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), Vol. I: 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, September 6-8, 2010. Bagnex, RILEM, 2010
- /Bra10b/ Brameshuber, W.; Hinzen, M.; Wochner, M.: Elegante Fußgängerbrücke aus textilbewehrtem Beton. *Betontechnologie, Herstellung der Fertigteile und Montage*. In: *Beton* 60 (2010), Nr. 11, S. 438-442,444.
- /Bra11/ Brameshuber, W.; Rahimi, A.; Weise, F.: Tiefenabhängige Feuchtemessung in Betonbauwerken - Vergleichende Untersuchungen mit der Multiring-Elektrode und dem Kernspinresonanz-Verfahren. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2011. - Forschungsbericht Nr. F 974; Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, 2011
- /Bre05/ Breitenbücher, R.; Homey, C.; Siebert, B.: Langzeitverhalten von Betoninstandsetzungssystemen nach 20-jähriger Auslagerung im Freien. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Bonn, H. 923, Oktober 2005

- /Bre07/ Breitenbücher, R.; Siebert, B.: Betoninstandsetzungssysteme nach 20-jähriger freier Bewitterung. In: Beton 57 (2007), Nr. 1+2, S. 28-30,32-33
- /Büt08/ Büttner, T.; Raupach, M.: Durability of Hydrophobic Treatments on Concrete - Results from Laboratory Tests. Freiburg: AEDIFICATIO, 2008. - In: Proceedings of the Hydrophobe V, Fifth International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Brüssel, April 15th and 16th, 2008, (Clercq De, H. ; Charola, A.E. (Eds.)), S. 329-340 ISBN 978-3-931681-92-0
- /Cur11/ Curbach, M.; Ortlepp, R. (Ed.): Textilbeton in Theorie und Praxis. Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereich 528 (Dresden) und 532 (Aachen), Berlin, 19.9.2011 - 20.09.2011. ISBN 978-3-86780-245-1
- /Coa99/ Coates, G.R.; Xiao, L.; Prammer, M.G.: NMR Logging Principles and Applications. Halliburton Energy Services Publication H02308. 1999. http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Books_and_Catalogs/web/Nmr_textbook/H02308.pdf
- /DAf89/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; DAfStb; Schriftenreihe Heft 401; Springenschmid, R.; Arbeitskreis „Prüfverfahren Chlorideindringtiefe“: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. Berlin: Beuth 1989
- /DAf01/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; DAfStb; DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze. Teil 2: Bauprodukte und Anwendung. Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung. Teil 4: Prüfverfahren. Ausgabe Oktober 2001. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2001. Inklusive Berichtigungen
- /DBV10/ Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein; DBV: Merkblatt Parkhäuser und Tiefgaragen (Fassung September 2010). Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, e.V., 2010
- /DFG537/ DFG FOR 537: Modellierung von Bewehrungskorrosion.
- /Die83/ Dieterich, D.; Girgat, E.; Hahn, H.: Chemische und physikalisch-chemische Grundlagen der Polyurethan-Chemie. München : Hanser, 1983. - In: Kunststoffhandbuch, (Becker, W.; Braun, D. (Ed.)), Band 7, S. 7-41
- /DIW08/ Goring, M.; Görzig, B.; Steinke, H.; Weber, S.: Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2008. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin.
- /Dol78/ Dolezel, B.: Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi. München: Hanser, 1978
- /Dom05/ Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6. Aufl.; Berlin: Springer, 2005
- /Dor79/ Doremus, R.H.: Chemical Durability of Glass. New York: Academic Press. - In: Treatise on Materials Science and Technology 17 (1979), S. 41-69
- /DWA10/ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt DWA-M 168 „Korrosion von Abwasseranlagen – Abwasserableitungen“. Juni 2010, Hennef.
- /DWD/ <http://www.dwd.de>. Klima und Umwelt/Sauerer Regen
- /Ehr07/ Ehrenstein, G.W.; Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. Bände 1-2. München: Hanser, 2007
- /Eng01/ Engelfried, R.: Schäden an polymeren Beschichtungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.-

- In: Schadenfreies Bauen (Zimmermann, G. (Hrsg.)), (2001), Nr. 26
- /Eng06/ Engelfried, R.; Bandt, M.; Titze, B.: Optimierte Leistungsfähigkeit von Oberflächenschutzsystemen in Naturzugkühltürmen mit Abgaseinleitung. In: VGB Power Tech 86 (2006), Nr. 10, S. 90-95
- /Eng11/ Engelfried, R.; Sage, F.; Eisenkrein, H.: Naturzugkühlturm mit Abgaseinleitung - Planung und Umsetzung von Schutzmaßnahme und Aussehensoptimierung. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2011. - In: 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Esslingen, 25. und 26. Januar 2011, (Raupach, M. (Ed.)), S. 511-522
- /Elk95/ Elkey, W.; Sellevold, E.J.; Norwegian Road Research Laboratory: Electrical resistivity of concrete. Oslo: Norwegian Public Roads Administration, Norwegian Road Research Laboratory, 1995. - Publication No. 80
- /Fen10/ Fenchel, M.; Müller, H.S.: Sulfate Attack on Concrete - Mechanisms and Prediction Model. Bagnex: RILEM, 2010. - In: Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science (MatSci), Vol. II: HetMat Modelling of Heterogeneous Materials, Aachen, September 6-8, 2010, (Bramshuber, W. (Ed.)). S. 229-238
- /Fie87/ Fiebrich, M.: Zur Adhäsion zwischen polymeren Bindemitteln und Beton unter besonderer Berücksichtigung von Wassereinwirkungen. Aachen, Technische Universität, Fachbereich 3, Diss., 1987
- /Fie99/ Fiebrich, M.: Durability of Polymer Coatings as Protection Against Carbonation and Chloride Penetration. Cacham Cedex, France: RILEM, 1999. - In: Proceedings of the Second International RILEM-Symposium on „Adhesion between Polymers and Concrete“, Dresden, September 14-17, 1999, S. 211-232
- /Fie09/ Fiebrich, M.: Trockenschichtdicken von Oberflächenschutzsystemen - Überwachungserfahrungen, technische und vertragsrechtliche Relevanz. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2009. - In: 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Ostfildern, 27. und 28. Januar 2009, (Raupach, M. (Ed.)), S. 85-91
- /Geh00/ Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerermessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 510 = Dissertation
- /DBV10/ Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (DBV); DBV-Merkblattsammlung: Merkblatt Parkhäuser und Tiefgaragen. Fassung September 2010. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, e.V., 2010
- /Ger02/ Gerdes, A.H.: Transport und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone. Freiburg: AEDIFICATIO. In: Building Materials Reports (2002), Nr. 15
- /Gie89/ Gieler, R.P.: Überlegungen und Versuche zur Reißüberbrückungsfähigkeit spezieller Beschichtungssysteme an Fassaden. Universität Dortmund, Fachbereich Bauwesen, Dissertation, 1989
- /Gie06/ Gieler, R.P.; Dimmig-Osburg, A.: Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung: Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser, 2006
- /Gis99/ Gislason, R.S.: Water Repellents: Protection of Facades of Concrete in a Wet Climate. In:

- Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege 5 (1999), Nr. 3, S. 251–272
- /God05/ Godefroy, S.; Ryland, B.; Callaghan, P.T.: 2D Laplace Inversion Instruction Manual. Victoria University of Wellington, Wellington, Neuseeland. 2005
- /Gro10/ Grondorf, Dudzik: AK Schwarzbach km 2,0 bis 5,0. Begehung des mit Glasauskleidungen sanierten Abwasserkanals DN 1600 im Bereich des Schachtes SWB 60 in Gelsenkirchen. Bericht. Emscher Genossenschaft. Juni 2010
- /Haa09/ Haardt, P.: Schutz und Instandsetzung im Regelungsbereich der ZTV-ING. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2009. - In: 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Ostfildern, 27. und 28. Januar 2009, (Raupach, M. (Ed.)), S. 3-10 = In: Beton 59 (2009), Nr. 12, S. 558-562
- /Han05/ Hankers, C.: Spritzbeton für die Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Spezial Nr. Juli, S. 49–56
- /Han09/ Hankers, C., Matzdorff, D.: Textilbewehrter Spritzbeton zur Bauwerksverstärkung. Fachaufsatz TORKRET AG, Spritzbeton-Tagung 2009 in Alpach, Tirol
- /Han10/ Hankers, C.: Textilbewehrter Spritzbeton zur Verstärkung von Geschossdecken. 2. Anwendertagung Textilbeton. TU Dresden, 1.10.2010
- /Han11/ Hankers, C.: Textilbeton zur Bauwerksverstärkung. 42. Aachener Baustofftag: Textilbeton in der Bauwerkserhaltung. 10. November 2011
- /Hel01/ Hellerich, W.; Harsch, G.; Haenle, .S.: Werkstoff-Führer Kunststoffe. 8. Aufl. München: Hanser, 2001
- /Hil06/ Hillemeier, B.; Osselmann, P.; Schubert, K.: Glass-Lining: Schutz für chemisch höchst beanspruchte Betonoberflächen. Weimar: F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2006.- In: 16. Internationale Baustofftagung, ibausil, 20.–23. September 2006, Weimar, Tagungsbände, Band 2, S. 2–1207–2–1212
- /Hol64/ Holland, L.: The Properties of Glass Surfaces. London: Chapman and Hall, 1964
- /Hop85/ Hope, B.B.; Alan, K.; Manning, D.G.: Corrosion and Electrical Impedance in Concrete. In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 3, S. 525-534
- /Hor09/ Horstmann, M.; Hegger, J.; Büttner, T.; Tomoscheit, S.; Pachow, U.: Neue Entwicklungen bei Berechnung und Anwendung von Sandwichfassaden aus Textilbeton. In: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.-5.6.2009, S. 503-514
- /Hup04/ Huppertz, F.; Neisecke, J.: Entwicklung eines praxisrelevanten Verschleißtests für rissüberbrückende Parkhausbeschichtungen - Stand der Forschung. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzung 10 (2004), Nr. 5, S. 497-510
- /Hup05/ Huppertz, F.: Abrieb von Bodenbeschichtungen auf Reaktionsharzbasis. Renningen: expert. - In: Kontakt und Studium (2005), Nr. 669, S. 166-175
- /Jäg01/ Jäggi, S.: Experimentelle und numerische Modellierung der lokalen Korrosion von Stahl in Beton unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Diss., 2001
- /Jun05/ Jung, W.; Schwamborn, B.; Stenner, R.: Beschichtungssysteme für Rampen von Parkhäu-

- sern - Ein viel diskutiertes Thema. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Spezial Nr. Juli, S. 39-48
- /Kau71/ Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbau-Technik (1971), Nr. 3, S. 131-135
- /Kee05/ Keeling, C.D.; Piper, S.C.; Bacastow, R.B.; Wahlen, M.; Whorf, T.P.; Heimann, M.; Meijer, H.A.: Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications, pages 83-113, in "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems", editors, Ehleringer, J.R., T. E. Cerling, M. D. Dearing, Springer Verlag, New York, 2005
- /Kei11/ Keil, A.; Orłowsky, J.; Raupach, M.: Einsatz eines mobilen NMR-Sensors als zerstörungsfreie Messmethode in der Bauwerkserhaltung. Bautechnik. Ausgabe 11/2011
- /Kit05/ Kittel, H.; Reul, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Band 7: Produkte für das Bauwesen, Beschichtungen, Bauklebstoffe, Dichtstoffe. 2. Aufl. Stuttgart : Hirzel, 2005
- /Klo74/ Klopfer, H.: Unterwasseranstrich in einem Schwimmbecken - Blasenbildung im Anstrich infolge ungenügender chemischer Aushärtung des Bindemittels. Stuttgart : Forum-Verlag, 1974. - In: Bauschäden Sammlung : Sachverhalt- Ursachen-Sanierung. Band 1, S. 149-152
- /Klo76/ Klopfer, H.: Anstrichschäden: Strukturen, Verhaltensweisen und Schadensformen von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen. Wiesbaden: Bauverlag, 1976
- /Klo04/ Klopfer, H.: Betoglass: Entkoppelter Oberflächenschutz aus Glas. Workshop Betonrohre & -schächte. 26.-29. Oktober 2004 BWI-Kongress. BetonWerk International, Nr. 5, Oktober 2004.
- /Kra03/ Kramer, E.: Anwendungsorientierte Prüfung der Beständigkeit von Polymerwerkstoffen. Frankfurt/Main: Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V., GfKORR, 2003. - In: 3-Länder-Korrosionstagung, Kunststoffkorrosion gibt es das wirklich? Basel, 24. und 25. April 2003, S. 35-41
- /Kra09/ Krams, J.; Stauder, F.: Parkhausbeschichtungen unter extremer Verschleißbeanspruchung. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2009. - In: 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Ostfildern, 27. und 28. Januar 2009, (Raupach, M. (Ed.)), S. 477-480
- /LAN10/ http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/ber_trend/kontiJKG2010.pdf
- /Lit01/ Littmann, K.; Charola, A.E.; Hydrophobe III: Third International Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, Proceedings of Hydrophobe III, Hannover, Sept. 25th and 26th, 2001. Freiburg: AEDIFICATIO, 20
- /Lit02/ Littmann, K.; Mengel, U; Herrmann, U.: Hydrophobierungen – über die Kunst, Wasser von mineralischen Baustoffen fernzuhalten, Hannover In: Übers Wasser – Unimagazin, Zeitschrift der Universität Hannover 3/4., 2002, S.68–71
- /Lit06/ Littmann, K.: Diagnose von Schäden an Bodenbeschichtungen mit Hilfe chemischer Analytik. Jahrestagung der Fachgruppe Bauchemie. 5. bis 6.10.2006, Karlsruhe. GDCh-Monographie Band 36, S. 213-222
- /Loh07/ Lohmann, T.: Vermeiden von Blasenbildung beim Beschichten poröser Untergründe. Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2007. - In: Industrieböden '07, Internationales Kolloquium, Ostfildern, 16. - 18. Januar 2007, (Seidler, P. (Ed.)), S. 275-283

- /Loh08/ Lohse, M.: Prognosen zur zukunftsorientierten Entwässerungsplanung mit Beachtung der Sulfidproblematik. In: H2S-Report (2008), Nr. 1/2, S. 20-23
- /Mag04/ Mager, M; Stingl, T.; Homann, M.; Jügens, E.; Itter, U.: Modern Polyurethanes for the Long-Lasting Elastification of Epoxy Resins. Paris: AFTPVA, 2004. In: XXVII FATIPEC Congress, Aix-en-Provence April 19–21 2004, Congress Proceedings Volume 2, S. 565–578
- /Mar96/ Marechal, J.Ch.; Kalifa, P.: The Prediction of Long-Term Sealant Performance from Dynamic Accelerated Weathering. London: E & FN Spon, 1996. - In: Durability of Building Materials and Components 6. Proceedings of the 7th International Conference held in Stockholm, Schweden 19-23 May 1996, (Sjöström, C. (Ed.), Vol. 1, S. 54-64
- /Mau04/ Maultzsch, M.: Dünnschichtige Spritzmörtel - Materialien für geringer feste Untergründe, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), BAW-Kolloquium der Abteilung Bautechnik, Instandsetzen von Wasserbauwerken ZTV-W LB 219 (2004), Hannover, 17. Oktober 2004, S. 41-46
- /Mei02/ Meier, S.J.: Grundlagen und Möglichkeiten einer Hydrophobierung von Betonbauteilen. Freiburg: AEDIFICATIO. In: Building Materials Reports (2002), Nr. 21 – Dissertation
- /Men02/ Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: Werkstoffkunde Kunststoffe. 5. Aufl. München: Hanser, 2002
- /Mic69/ Michel, M.: Adhäsion und Klebtechnik. München: Hanser, 1969
- /Mie10/ Mielich, O.: Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2010), Nr. 583
- /Mir96/ Mirwald, P. W.; Brüggerhoff, S.: Requirements for and Interpretation of Accelerated and Field Testing. Chichester. John Wiley & Sons Ltd., 1997. In: Dahlemer Workshop Reports. Saving our Architectural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures, Berlin. March 3-8, 1996, (Baer, N. S. and Snethlage, R. (Edit.)). S. 255-268. 1997
- /Mom06/ Momber, A.W.; Schulz, R.-R.: Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Basel: Birkhäuser, 2006
- /Mül93/ Müller, T.; Gerdes, A.; Wittmann, F.H.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit einer Hydrophobierung von Beton. Ehningen: Expert, 1993. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tagungsbericht des dritten Internationalen Kolloquiums, (Wittmann, F.H.; Bartz, W.J. (Ed)), Teil 1, S. 476–493
- /New85/ Newton, R.G.: The Durability of Glass - A Review. In: Glass Technology 26 (1985), Nr. 1, S. 21-38
- /Oeh05/ Oehler, H.; Lellinger, D.; Alig, I.: Filmbildung von Dispersionen mit Ultraschall verfolgen. Farbe & Lack 111, 7 (2005) 22-24
- /Oeh07/ Oehmichen, D.S.; Gerdes, A.: Hydrophobierung von Betonoberflächen. Innsbruck: Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, 2007. In: Verstärken und Instandsetzen von Betonkonstruktionen 2007. Berichtsband der 6. Intern. Fachtagung, Innsbruck, 25. + 26. Januar 2007, (Kusterle, W.; et. al. (Eds)), S. 159-168
- /Orl05/ Orłowski, J.: Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton. Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2005), Nr. 558; zugl.:

RWTH Aachen, Fachbereich 3, Dissertation, 2004

- /Orl05b/ Orłowsky, J.; Walk-Laufer, B.: Eigenschaften verschiedener Produkte zur Verfestigung von Betonfassaden. In: *Restoration of Buildings and Monuments* 11 (2005), Nr. 5, S. 297-308
- /Orl08a/ Orłowsky, J.; Raupach, M.; Baias, M.; Blümich, B.: Application of the NMR-Technique to Concrete Coatings. *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR)*, Cape Town, South Africa, 335-336, (2008)
- /Orl08b/ Orłowsky, J.; Raupach, M.: Durability Model for AR-glass Fibres in Textile Reinforced Concrete, *Materials and Structures (RILEM)* 41 (2008), Nr. 7, S. 1225-1233. ISSN 1359-5997
- /Orl09/ Orłowsky, J.: Zerstörungsfreie Bestimmung der Schichtdicken, Feuchtigkeit und Alterung von Beschichtungen mittels NMR-MOUSE. In: *Restoration of Buildings and Monuments* 15 (2009), Nr. 5, S. 325-332. ISSN 1864-7251
- /Orl10a/ Orłowsky, J.; Raupach, M.: Biogene Schefelsäurekorrosion in Abwasseranlagen - Mechanismen und Schutzmöglichkeiten. In: *Aachener Schriften zur Stadtentwicklung* (2010), Nr. 14, 11. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 2010, Köln, 29. und 30. September 2010, S. 8/1-8/9. ISBN 978-3-938996-07-2
- /Orl10b/ Orłowsky, J.: NMR Inspection on Concrete Coatings. Bagnoux: RILEM, 2010. - In: *PRO 70, Service Life Design for Infrastructure, Proceedings of the 2nd International Symposium, Delft, Netherlands, 4-6 Oktober 2010*, (Breugel van, K. ; Ye, G. ; Yuan, Y. (Eds.)), Vol. 2, S. 1019-1026. ISBN 978-2-35158-096-7
- /Orl11a/ Orłowsky, J.; Raupach, M.: Textilbeton in der Bauwerkserhaltung - Von der Forschung zur Anwendung, 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Esslingen, 25. und 26. Januar 2011, S. 11-16, ISBN 3-924813-87-6
- /Orl11b/ Orłowsky, J.; Raupach, M.: Characterisation of Polymers Using Mobile NMR. Warsaw, Poland: ESPSC, 2011. - In: *European Symposium on Polymers in Sustainable Construction. Czarnecki Symposium, Warsaw, September, 6-7th, 2011*, 8 Seiten
- /Orl11c/ Orłowsky, J.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Öztürk, T.: Textilbewehrte Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. In: *Beton* 12/2011
- /Orl12/ Orłowsky, J.: Measuring layer thicknesses of concrete coatings by mobile NMR - a study about the influence of steel reinforcement. In: *Construction & Building Materials* 27 (2012), p. 341-349. Elsevier
- /Pak06/ Pakusch, J.: *Aqueous Polymers for the Construction Industry*. London: Taylor & Francis Group, 2006. In: *Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR)*, Cape Town, South Africa, 21-23 November, 2005, (Alexander, M.G.; Beushausen, H.-D.; Dehn, F.; Moyo, P. (Eds.)), S. 350-351
- /Per05/ Perlo, J.; Casanova, F.; Blümich, B.: Profiles with microscopic resolution by single-sided NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, Volume 176, Issue 1, 64-70, (2005)
- /Pus10/ Pusel, T.; Zilg, C.; Stöhr, B.; Bänziger, H.: Verbesserung der Feuchtigkeitstoleranz von Verschleißschichten für Parkbauten. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2010. - In: *Verkehrsbauten Schwerpunkt Parkhäuser 4. Kolloquium, Ostfildern, 02. und 03. Februar 2010*, (Gieler-Breßmer, S. (Ed.)), S. 435-438

- /Rau92/ Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Nr. 433
- /Rau02/ Raupach, M.; Wolff, L.: Dauerhaftigkeit neuer Hydrophobierungen auf Beton, Aachen: Institut für Bauforschung, 2002. - Forschungsbericht Nr. F 677
- /Rau04/ Raupach, M.; Wolff, L.: Reduktion der Bewehrungsüberdeckung bei vorhandener Beschichtung bei Parkhaus-Neubauten. Stuttgart: IRB-Verlag, 2004. Best.-Nr. T 3063; ISBN 3-8167-6692-7; Aachen : Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 892
- /Rau05/ Raupach, M.; Rößler, G.: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz. Aachen: Institut für Bauforschung, 2005.- Forschungsbericht Nr. F 905
- /Rau06/ Raupach, M.; Rößler, G.; BAST: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau (2006), Nr. B 49
- /Rau08/ Raupach, M.; Orłowsky, J.: Erhaltung von Betonbauwerken - Baustoffe und ihre Eigenschaften. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2008. ISBN 3-8351-0120-X / ISBN 978-3-8351-0120-3
- /Rau08a/ Raupach, M.; Orłowsky, J.: Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. Grundlagen, Planung und Instandsetzungsprinzipien nach neuer Norm. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2008. ISBN 978-3-7640-0475-0
- /Rau09a/ Raupach, M.; Antons, U.: Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen auf Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2009. - Forschungsbericht Nr. F 976
- /Rau09b/ Raupach, M.; Rößler, G.; Dauberschmidt, C.; Meng, B.; Pierkes, R.; Schwamborn, B.; Wiens, U.: Instandsetzung von Meerwasserbauten. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2009. - Forschungsbericht Nr. F 647
- /Rau10/ Raupach, M.; Büttner, T.; Maintz, H.: Retrofitting AACHEN Cathedral with a Flexible Textile Reinforced Mortar Bandage. Vancouver: University of British Columbia, 2010. - In: Conservation of Heritage Structures. Proceedings of the Third International Workshop on Civil Structural Health Monitoring: Conservation of Heritage Structures Using FRM and SHM, Ottawa, Canada, August 11 - 13, 2010, (Banthia, N. ; Mufti, A. (Eds.)), S. 47-60. ISBN 978-0-88865-883-8.
- /Rau11a/ Raupach, M.; Keil, A.; Helm, C.: Gleichwertige Instandsetzung bei reduzierter Betondeckung. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2011. - Forschungsbericht Nr. F 945
- /Rau11b/ Raupach, M.; Orłowsky, J.; Büttner, T.: Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Textilbeton mittels Polymeren - Materialauswahl und Langzeitprognose. Technische Universität Dresden, 2011. - In: Textilbeton in Theorie und Praxis. Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereich 528 (Dresden) und 532 (Aachen), Berlin, 19.9.2011 - 20.09.2011, (Curbach, M. ; Ortlepp, R. (Ed.)), S. 227-244 ISBN 978-3-86780-245-1
- /Rie79/ Rieche, G.: Rissüberbrückende Kunststoffbeschichtungen für mineralische Baustoffe. In: Farbe + Lack 85 (1979) Nr. 10, S. 824-831
- /Rig05/ Rigo, E.: Ein probabilistisches Konzept zur Beurteilung der Korrosion zementgebundener

- Baustoffe durch lösenden und treibenden Angriff. Dissertation, TU Braunschweig, 2005
- /Rig09/ Rigo, E.; Schmidt-Döhl, F.; Budelmann, H.: Probabilistic Concept for Durability Design of Cement-Based Materials Exposed to Acid, Ammonium, and Sulphate Solution. Göttingen: Cuvillier, 2009. - In: Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials. Final Report on Priority Program 1122 Funded by the German Research Foundation DFG, (Franke, L.; Deckelmann, G.; Espinosa-Marzal, R. (Eds.)), S. 243-258
- /Rog82/ Rogalla, D.G.: Ein Beitrag zur Erklärung der Spannungsrißbildung bei Kunststoffen. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss., 1982
- /Ruc06/ Rucker, P.; Beddoe, R.E.; Schießl, P.: Wasser- und Salzhaushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe - Modellierung der auftretenden Mechanismen. In: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Nr. 6, S. 402-412
- /Sal09/ Salzer, R.; Siesler, H. W.: Infrared and Raman Spectroscopic Imaging. Wiley-VCH, Weinheim, Germany. 2009
- /Sas93/ Sasse, H.R.; Riecken, B.: "VENUS" - A New Concept in Laboratory Simulation of Aggressive Climatic Conditions. London: E.&FN. SPON, 1993. - In: Proceedings of the International RILEM/ UNESCO Congress Conservation of Stone and Other Materials, held at UNESCO Headquarters, Paris, June 29-July 1, 1993 (Thiel, M.J.(Ed.)), Vol 2,S. 801-807. 1993
- /Sas94/ Sasse, H.R.; Schießl, P.; Fiebrich, M.; Kwasny-Echterhagen, R.; et. al.: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen. Sachstandsbericht. Berlin: Beuth, 1994. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1994), Nr. 443
- /Sas97/ Sasse, H.R.; Littmann, K.: Entwicklung von Anforderungskriterien für die Dauerhaftigkeit von Fahrbahnabdichtungen in Trog- und Tunnelbauwerken. Aachen: Institut für Bauforschung, 1997. - Forschungsbericht F 345
- /Sat95/ Sattler, L.; Snethlage, R.: Der Einsatz von Kieselsäureester zur Sandsteinfestigung. Berlin: Ernst & Sohn, 1995. - In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft Natursteinkonservierung Band I - 1995, (Snethlage, R.(Ed.)), S. 89-104
- /Scho88/ Scholze, H.: Glas, Natur, Struktur und Eigenschaften. 3. Aufl. Berlin : Springer, 1988
- /Schö11/ Schoene, J.; Reisgen, U.; Schleser, M.; Jerabek, J.: Theoretische und experimentelle Untersuchung des spaltungsinduzierten Versagens von TRC Prüfkörpern. Technische Universität Dresden, 2011. - In: Textilbeton in Theorie und Praxis. Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereich 528 (Dresden) und 532 (Aachen), Berlin, 19.9.2011 - 20.09.2011, (Curbach, M. ; Ortlepp, R. (Ed.)), S. 73-84
- /Schi96/ Schießl, P. ; Meng, B.: Grenzen der Anwendbarkeit von Puzzolanen im Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, 1996. - Forschungsbericht Nr. F 405
- /Schu99/ Schueremans, L.; Gemert Van, D.: Effectiveness of Hydrophobic Treatment as Chloride Penetration Barrier – on the Site Investigations and Service Life Prediction Model, Freiburg: AEDIFICATIO, 1999. In: Werkstoffwissenschaft und Bauinstandsetzen. Berichtsband zum fünften Internationalen Kolloquium, Band I, Esslingen, Nov./Dec. 1999, (Wittmann, F.H. ; Gerdes, A. (Ed.)), S.731-740

- /Schu08/ Schueremans, L.; Gemert Van, D.; Friedel, M.; Giessler-Blank, S.: Durability of Water Repellents in a Marine Environment. Freiburg : AEDIFICATIO, 2008. - In: Proceedings of the Hydrophobe V, Fifth International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Brüssel, April 15th and 16th, 2008, (Clercq De, H. ; Charola, A.E. (Eds.)), S. 357-368
- /Schw95/ Schwamborn, B.: Zum Leistungsvermögen von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (1995), Nr. 5
- /Set99/ Setzer, M.J.: Mikroislinsenbildung und Frostschaden. Stuttgart: ibidem, 1999. - In: Werkstoffe im Bauwesen - Theorie und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. H.W. Reinhardt, (Eligehausen, R. (Ed.)), S. 397-413
- /Sha03/ Sharma, S.; Casanova, F.; Wache, W.; Segre, A.; Blümich, B.: Analysis of Historical Porous Building Materials by the NMR-MOUSE®. In: Magnetic Resonance Imaging 21 (2003), S. 249-255
- /Shc02/ Shchepochkina, Y. A.: Defects in glazing of concrete articles. In: Glass Ceram. 59 (2002), S. 145-146
- /Sil05/ Silfwerbrand, J.; Hydrophobe IV: Proceedings of Hydrophobe IV, International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Stockholm, April 12-13, 2005. Freiburg: AEDIFICATIO, 2005
- /Sta01/ Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton: Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser, 2001
- /Ste99/ Stenner, R.: EN 1062-7 Determination of Crack-Bridging Properties. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 1999. In: Industrieböden '99 Internationales Kolloquium 12.-14. Januar 1999, (Seidler, P. (Ed.)), Vol. II, S. 693-699
- /Sti07/ Stingl, T.: Wässrige, VOC-freie 2K Polyurethan-Bindemittel für Boden- und Bauanwendungen. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2007. In: Industrieböden '07, Internationales Kolloquium, Ostfildern, 16. -18. Januar 2007, (Seidler, P. (Ed.)), S. 677-682
- /Sto87/ Stohler, F.; Berger, K.: Neueste Ergebnisse über die Stabilisierung von Polyurethansystemen gegen photooxidative Einflüsse. Wien: TGM-Kunststofftechnik, 1987. - In: 18. Donauländergespräch über natürliche und künstliche Alterung von Kunststoffen. Warmbad Villach, 24.06-26.06.1987, Vortrag 21 Seiten
- /Str08/ Stratemeier, N.; Hüttl, R.; Spohr, I.; Breitenbücher, R.: Evaluation von Baustoffen und Korrosionssystemen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von abwassertechnischen Anlagen. In: BFT International 74 (2008), Nr. 5, S. 4-6,8-13
- /VDI94/ VDI-Richtlinie Umweltmeteorologie. VDI 3789, Oktober 1994
- /War41/ Warren, B.E.: Summary of Work on Atomic Arrangement in Glass. In: Journal of the American Ceramic Society 24 (1941), Nr. 8, S. 256-261
- /War03/ Warkus, J.: Bestimmung des Wassergehaltes von Beton und Naturstein durch Messung des Elektrolytwiderstandes - Grundlagen. Aachen: Institut für Bauforschung, 2003. - In: Zustandserfassung von Bauwerken - Neue Verfahren und System, 29. Aachener Baustofftag, Aachen 18. November 2003, 16 Seiten
- /Wei09/ Weichold, O.; Orłowsky, J.: Hochleistungs Oberfläche für Betonbauwerke mit nanover-

- stärktem Polyalkoxysiloxan. In: *Restoration of Buildings and Monuments* 15 (2009), Nr. 5, S. 333-342. ISSN 1864-7251
- /Wes93/ Wesche, K.H.: *Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk.* 3. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1993
- /Wes06/ Westendarp, A.; Reschke, T.; Kühne, H.-C.; Maultzsch, M.; Dauberschmidt, C.; Rößler, G.: *Instandsetzung von Wasserbauwerken aus Beton: Planung, Bauausführung und Qualitätssicherung, Teil 1+2.* In: *Beton* 56 (2006), Nr. 1/2, S. 22-24,26-29, Nr. 3, S. 94-96,97-100
- /Wit01/ Wittmann, F.H.; Meier, S.J., Gerdes, A.: *Hydrophobierungen von Betonoberflächen.* NR-Workshop 2001. Paul Scherrer Institut.
- /Wit04/ Wittmann, F.H.; Meier, S.J.: *Hydrophobieren von Betonoberflächen: Empfehlungen für die Applikation.* In: *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* 10 (2004), Nr. 4, S. 387-416
- /Wol03/ Wolff, L.; Raupach, M.: *Hydrophobieren von Stahlbetonoberflächen: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit mit Multiring-Elektroden.* In: *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 69 (2003), Nr. 10, S. 12-14,16-18,20-21
- /Wol07/ Wolff, L.; Raupach, M.; Hailu, K.: *Ursachen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton – Welche Rolle spielt die Osmose?: Causes of Blistering of Reaction Resin Coatings on Concrete – is Osmosis Relevant?* In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Nr. 7, S. 439-449 [ISSN: 0005-9900]
- /Wol08/ Wolff, L.; Raupach, M.: *Beschichtungsschäden – Schadensmechanismen und Lösungsansätze.* Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2008. In: *Verkehrsbauten: Schwerpunkt Parkhäuser, 3. Kolloquium, Ostfildern.* 29-30. Januar 2008, (Gieler-Breßmer, S. (Ed.))
- /Wol09/ Wolff, L.: *Mechanismen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton.* Berlin: Beuth. - In: *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton* (2009), Nr. 576. Zugl. Dissertation ISBN 3-410-65049-2
- /Wol96/ Wolfseher, R.: *Die Hydrophobierung in der Praxis – eine leistungsfähige Behandlung für Beton bis Naturstein.* Freiburg: AEDIFICATIO. In: *WTA-Schriftenreihe* (1996), Nr. 10, S. 59-74
- /You05/ Young, T.: *An Essay on the Cohesion of Fluids.* In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 95 (1805), S. 65-72
- /Zil08/ Zilg, C.; Pusel, T.; Bänziger, H.: *Abnutzungsprüfung von OS Parkhaussystemen unter „Real-Bedingungen“.* Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, 2008. - In: *Verkehrsbauten Schwerpunkt Parkhäuser/Brücken. 3. Kolloquium, Ostfildern,* 29. und 30. Januar 2008, (Gieler-Breßmer, S. (Ed.)), S. 295-298
- /TP90/ Bundesminister für Verkehr. ZTV-SIB 90. TL/TP OS: *Technische Lieferbedingungen/Prüfvorschriften für Oberflächenschutzsysteme.* Dortmund, Verkehrsblatt 1990
- /TP96/ Bundesminister für Verkehr. ZTV-SIB 96. TL/TP OS: *Technische Lieferbedingungen/Prüfvorschriften für Oberflächenschutzsysteme.* Dortmund, Verkehrsblatt 1996
- /ZTV03/ Bundesanstalt für Straßenwesen; ZTV-ING: *Baudurchführung: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-Ing. (inkl. ZTV-Kor-Stahlbauten 02)* Dortmund: Verkehrsblatt, 2003

- /ZTVW/ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; BMV; ZTV-W: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV.W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219) Ausgabe 2004
- /BELEP/ Technische Lieferbedingungen für Reaktionsharze für Grundierungen, Versiegelungen und Kratzspachtelungen unter Asphaltbelägen auf Beton. Ausgabe 1999

10.2 NORMEN

- DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- DIN 5031-7: 01.84 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Benennung der Wellenlängenbereiche
- DIN 18195-5: 08.00 Bauwerksabdichtungen. Teil 5: Abdichtungen gegen nichtdrückendes Wasser auf Deckenflächen und in Nassräumen, Bemessung und Ausführung
- DIN V 18026: 06.06 Oberflächenschutzsysteme für Beton aus Produkten nach DIN EN 1504-2:2005-01
- DIN V 18028: 06.06 Rissfüllstoffe nach DIN EN 1504-5:2005-03 mit besonderen Eigenschaften
- DIN EN 196-1: 05.2005 Prüfverfahren für Zement. Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- DIN EN 660-1: 06.99 Elastische Bodenbeläge. Ermittlung des Verschleißverhaltens. Teil 1: Stuttgarter Prüfung
- DIN EN 1062-7: 08.04 Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich. Teil 7: Bestimmung der rissüberbrückenden Eigenschaften
- DIN EN 1062-11: 10.02 Beschichtungsstoffe. Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich. Teil 11: Verfahren zur Konditionierung vor der Prüfung
- DIN EN 1504: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken
- DIN EN 1766: 03.00 Prüfverfahren. Referenzbetone für Prüfungen
- DIN EN 13581: 12.02 Prüfverfahren. Bestimmung des Masseverlustes von hydrophobiertem Beton nach der Beanspruchung durch Frost-Tausalz-Wechsel
- DIN EN 13687-1: 05.02 Prüfverfahren. Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit. Teil 1: Frost-Tau-Wechselbeanspruchung mit Tausalzangriff
- DIN EN 13687-2: 05.02 Prüfverfahren. Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit. Teil 2: Gewitterregenbeanspruchung (Temperaturschock)
- DIN EN 13687-3: 05.02 Prüfverfahren. Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit. Teil 3: Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzangriff

- DIN EN 13892-3: 07.04 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen. Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme
- DIN EN 13892-4: 02.03 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen. Teil 4: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach BCA
- DIN EN 13892-5: 09.03 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen. Teil 5: Bestimmung des Widerstandes gegen Rollbeanspruchung von Estrichen für Nutzschichten
- DIN EN 14629: 06.07 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehaltes in Festbeton
- DIN EN ISO 2409: 08.07 Beschichtungsstoffe. Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2007)
- DIN EN ISO 5470-1: 09.99 Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien Bestimmung des Abriebwiderstandes. Teil 1: Taber-Abriebprüfgerät
- DIN EN ISO 11664-4: 07.11 Farbmeterik – Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum (ISO 11664-4:2008)
- DIN EN ISO 15148: 03.2003 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen

