

Universität Dortmund

DISSERTATION

Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen

zur Erlangung des Titels Doktor-Ingenieur
der Fakultät Bauwesen

eingereicht von Dipl.-Ing. Silke Katschke
aus Dortmund

Gutachter: 1. Prof. Dr. J. Neisecke
 2. Prof. Dr. H. G. Schäfer

eingereicht: 08.04.2002

Datum der Promotion: 19.06.2002

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND ZIELE DER ARBEIT	5
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	8
2.1	GESTALTUNG UND HERSTELLUNG STRUKTURIERTER BETONoberFLÄCHEN	8
2.2	URSACHEN UND MECHANISMEN VON STAHLBETONoberFLÄCHENSCHÄDEN	12
2.3	SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON STAHLBETONoberFLÄCHEN	17
2.3.1	VERFAHRENSWEISE DER STAHLBETONINSTANDSETZUNG	17
2.3.2	INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE	18
2.4	SCHICHTDICKEN VON oberFLÄCHENSCHUTZSYSTEMEN	22
2.4.1	SCHICHTDICKENBESTIMMENDE EINFLUSSGRÖSSEN	24
2.4.2	VERFAHREN ZUR SCHICHTDICKENMESSUNG	27
2.4.3	STATISTISCHE GRUNDLAGEN	28
2.4.3.1	Auswertung von Schichtdickenmessungen	28
2.4.3.2	Darstellung von Schichtdickenverteilungen	31
2.5	SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON WASCHBETONoberFLÄCHEN	33
2.5.1	STAND DER TECHNIK	33
2.5.2	INSTANDSETZUNGSVARIANTEN	35
2.5.3	ANFORDERUNGEN AN oberFLÄCHENSCHUTZSYSTEME	36
3	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	37
3.1	ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	37
3.2	VORUNTERSUCHUNGEN IM LABOR	38
3.2.1	PROBEKÖRPER	38
3.2.2	INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE	39
3.2.3	HERSTELLUNG DER VERBUNDKÖRPER	40
3.2.4	FREILEGEN DER WASCHBETONSTRUKTUR	41
3.2.5	UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE	42
3.2.5.1	Materialkennwerte	42
3.2.5.2	Applikation und Auftragsmengen	42
3.2.5.3	Freilegen der Waschbetonstruktur	43
3.2.5.4	Visuelle Kontrolle	44
3.2.5.5	Verbundverhalten	45
3.2.6	ZUSAMMENFASSUNG DER VORUNTERSUCHUNGEN IM LABOR	47
3.3	UNTERSUCHUNGEN AM BAUWERK	50
3.3.1	ANGABEN ZUM BAUWERK	50
3.3.2	INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE	52
3.3.3	ANLEGEN DER PROBEFLÄCHEN	52
3.3.4	UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE	54
3.3.4.1	Materialkennwerte	54
3.3.4.2	Applikation und Auftragsmengen	55

3.3.4.3	Freilegen der Waschbetonstruktur	55
3.3.4.4	Visuelle Begutachtung	56
3.3.4.5	Verbundverhalten	57
3.3.4.6	Strukturuntersuchungen	59
3.3.4.7	Schutzwirkung der Oberflächenschutzsysteme	61
3.3.4.7.1	Karbonatisierung	61
3.3.4.7.2	Bestimmung der Schichtdicken von OS-Beschichtungen	62
3.3.5	ERKENNTNISSE AUS DEN UNTERSUCHUNGEN AM BAUWERK	67
3.4	VERTIEFENDE UNTERSUCHUNGEN IM LABOR	69
3.4.1	WASCHBETONGRUNDKÖRPER	69
3.4.2	INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE	71
3.4.3	APPLIKATION DER OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME	71
3.4.4	ART UND ANZAHL DER LABORPROBEKÖRPER	72
3.4.5	UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE	73
3.4.5.1	Materialkennwerte	73
3.4.5.2	Applikation der PCC-Mörtel /-Spachtel	74
3.4.5.3	Freilegen der Waschbetonstruktur	75
3.4.5.4	Applikation der Oberflächenschutzbeschichtung	78
3.4.5.5	Verbundverhalten und Struktur	81
3.4.5.6	Schutzwirkung der Oberflächenschutzsysteme	82
3.4.5.6.1	Karbonatisierung	82
3.4.5.6.2	Bestimmung der Schichtdicken von OS-Beschichtungen	84
4	STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN	91
5	ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	95
5.1	SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON WASCHBETON	95
5.2	STATISTISCHE AUSWERTUNG VON SCHICHTDICKENMESSUNGEN	99
5.3	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS	101
6	LITERATURVERZEICHNIS	103
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	110
8	TABELLENVERZEICHNIS	112
9	TABELLENANHANG	114

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstoffe des Bauwesens an der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund.

Die Themenstellung, Untersuchungen zur Eignung von Werkstoffen und Verfahren für Schutz und Instandsetzung strukturierter Betonoberflächen am Beispiel von Waschbetonoberflächen, resultiert aus der Bearbeitung umfangreicher Bauwerksuntersuchungen, der Mitarbeit im Arbeitskreis "Liste" nach ZTV-SIB und dem nachfolgenden Arbeitskreis Prüf- Überwachungs- und Zertifizierungsstellen SIB nach Bauregelliste.

Mein herzlicher Dank gilt allen, die mir die Durchführung der Arbeit ermöglichten:

- insbesondere Herrn Prof. Dr. J. Neisecke für die menschliche Unterstützung, die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die fachliche Betreuung, die er mir zuteil werden ließ
- Herrn Professor Dr. H. G. Schäfer für sein Interesse an dieser Arbeit, seine Bereitschaft zur Mitbetreuung und der damit verbundenen Mühe
- den Firmen, die mir durch fachliche Auseinandersetzung und Bereitstellung von Materialien wertvolle Hilfestellung leisteten
- den MitarbeiterInnen des Lehrstuhls für Werkstoffe des Bauwesens, Frau Fißmer, Frau Sander, Frau Banczyk und des Instituts für Bauforschung, Herrn Dipl.-Ing. Penter, Herrn Pastoor, Herrn Aebersold und Herrn Lütteken, deren tatkräftige Mithilfe mir die Durchführung des experimentellen Teils der Untersuchungen ermöglichte
- den MitarbeiterInnen des statistischen Beratungs- und Analyse zentrums der Universität Dortmund, Herrn PD Dr. Christmann und Frau cand. stat. Miede für Ihre geduldige Unterstützung, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat
- last but not least - unserer Sekretärin Frau Anne Kempka, die stets um mein leibliches und seelisches Wohlergehen besorgt war

1 EINLEITUNG UND ZIELE DER ARBEIT

"Die wachsende Erkenntnis der Vorzüge des Betonwerksteins und die Vervollkommnung seiner Herstellung haben es mit sich gebracht, daß es heute wohl kein Baugebiet mehr gibt, wo sich Kunststein nicht anwenden ließe. Keine künstlerische und architektonische Form, die er sich nicht erobert hätte." /Pet1/. Dieses Zitat von Petry, nachzulesen in seinem Buch über das Gestalten von Beton aus dem Jahre 1913, gilt heute noch in gleichem Maße. So ist der Verbundbaustoff Stahlbeton aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit und nahezu beliebigen Formbarkeit der am häufigsten verwendete Konstruktionsbaustoff. Viele der modernen Bauaufgaben sind durch ihn erst technisch lösbar geworden und der planerische und konstruktive Freiraum von Architekten und Ingenieuren wurde stark erweitert.

Weiter heißt es bei Petry "Zur Erzeugung eines erstklassigen Betonwerksteines gehören reiche Erfahrung, tadellose Rohmaterialien, zuverlässige Arbeitsweise, viel technisches und erprobtes Wissen und nicht zuletzt ein großes Maß an künstlerischem Gefühl und Verständnis" /Pet1/. Auch heute, fast 90 Jahre später kann man es nicht treffender beschreiben. Da es aber häufig an einigen der aufgezählten Parameter mangelte, erwarb sich der "Jahrhundertbaustoff" Stahlbeton zu Beginn der siebziger Jahre einen äußerst schlechten Ruf in der Öffentlichkeit, ausgelöst durch Schäden in nahezu unüberbarem Ausmaß aufgrund mangelhafter Bauausführung sowie verbreitet liebloser Gestaltung.

Ursachen und Mechanismen der typischen durch Bewehrungskorrosion hervorgerufenen Stahlbetonoberflächenschäden sind inzwischen ausführlich wissenschaftlich erforscht und dokumentiert. Seit Ende der achtziger Jahre existieren auch einschlägige Regelwerke und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonoberflächen wie ZTV-SIB /BMV1/ und Rili-SIB /DAfStb1/, in denen Anforderungen an Werkstoffe, Verfahren und Qualitätssicherung festgelegt sind. Parallel zu diesen Richtlinien wurden Werkstoffsysteme für Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonoberflächen entwickelt und optimiert. Heute stehen daher eine Vielzahl ZTV-SIB geprüfte und zugelassene Werkstoffe zur Verfügung. Der Problembereich Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonoberflächen kann daher, sofern es sich um glatte Oberflächen handelt, als abschließend bearbeitet und Stand der Technik angesehen werden.

Naturgemäß treten auch an strukturierten oder ausgewaschenen Betonoberflächen derartige Oberflächenschäden auf. Für solch raue oder strukturierte Betonoberflächen gibt es jedoch in den vorhandenen Richtlinien und Regelwerken keinerlei Hinweise oder Anforderungen, dementsprechend ist auch unklar, ob sich die heute üblichen Schutz- und Instandsetzungswerkstoffe und -verfahren auf diesen Oberflächen einsetzen lassen, wie ggf. vorzugehen ist und wie die Erfolgsaussichten zu beurteilen sind.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung der wichtigen und gesicherten Erkenntnis, daß für Erfolg und Dauerhaftigkeit einer Schutz- und Instandsetzungsmaßnahme die Ausführungsqualität der abschließenden Oberflächenschutzbeschichtung von ganz entscheidender Bedeutung ist, ergeben sich für diese Arbeit zwei wesentliche Bearbeitungsziele:

- a) Eine umfangreiche materialtechnologische Untersuchung soll klären, ob die für Schutz und Instandsetzung glatter Stahlbetonoberflächen zugelassenen Werkstoffsysteme auch auf strukturierten Betonoberflächen erfolgreich einsetzbar sind. Dies soll an Laborprobekörpern und auch an realen Bauwerksoberflächen untersucht werden. Stellvertretend für die Vielzahl strukturierter Betonoberflächen wurde hier Waschbeton ausgewählt, da diese Strukturvariante relativ einfach herstellbar und sehr häufig auch großflächig an Gebäudefassaden anzutreffen ist. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Frage, ob und inwieweit sich die ursprüngliche, typische Waschbetonstruktur trotz der Schutz- und Instandsetzungsmaßnahme erhalten läßt, um den Gesamteindruck des Gebäudes möglichst wenig zu verändern. Diesem Aspekt sollte grundsätzlich bei der Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken größeres Augenmerk gewidmet werden. In diesen ersten, experimentellen Untersuchungsabschnitt werden zugelassene PCC-Mörtel und PCC-Spachtel sowie unterschiedliche Oberflächenschutzbeschichtungen einbezogen.
- b) Das zweite wesentliche Ziel dieser Arbeit ist die Klärung der Fragen, ob sich auf strukturierten Betonoberflächen (hier auf Waschbeton s.o.) die für den dauerhaften Schutz erforderlichen Mindestschichtdicken der Oberflächenschutzbeschichtung mit der nötigen Sicherheit erreichen lassen und wie dieser Nachweis geführt werden kann. Dieses schon bei der Beschichtung glatter Betonoberflächen nicht immer sicher zu lösende Problem gestaltet sich bei strukturierten Betonoberflächen, die in der Beschichtungstechnik eigentlich unerwünscht sind, naturgemäß deutlich schwieriger. Der Nachweis sogenannter statistischer Merkmale wie "mittlere Schichtdicke" und insbesondere "systemspezifische Mindestschichtdicke", auf denen die Anforderungen der Regelwerke basieren, setzt zunächst eine Vielzahl von Schichtdickenmeßwerten voraus, die eine repräsentative, d.h. unter statistischen Gesichtspunkten entnommene Stichprobe bilden. Es muß vermutet werden, daß diese Schichtdickenmeßwerte auch besonders wegen der strukturierten Oberfläche über einen großen Bereich streuen.

Wesentlich für die Bewertung der Ausführungsqualität ist die Frage, welcher statistischen Verteilung die Schichtdickenmeßwerte auf strukturierten Oberflächen folgen.

Daß dies zwangsläufig die im Bauwesen häufig benutzte Gauß'sche Normalverteilung ist, kann keinesfalls vorausgesetzt werden, da die Wahrscheinlichkeit der Anordnung statistischer Merkmale für alle möglichen statistischen Verteilungsarten grundsätzlich gleich ist. Weiterhin stellt sich für die Praxis das Problem, wie das Ergebnis der Stichprobe bzw. die vergleichende Darstellung verschiedener Stichproben am vorteilhaftesten darzustellen ist.

Die Beantwortung der Frage nach statistisch gesicherten Bewertungskriterien für die Ausführungsqualität der Oberflächenschutzbeschichtung ist daher wesentliches Ziel des zweiten, mehr theoretischen Arbeitsschrittes dieser Arbeit

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 GESTALTUNG UND HERSTELLUNG STRUKTURIERTER BETONoberFLÄCHEN

Betonoberflächen können sehr vielseitig und architektonisch anspruchsvoll durch effektvolle Oberflächenprofilierungen gestaltet werden. Unterschieden wird zwischen der Formgebung durch die Schalung während des Erhärtens und Bearbeitungstechniken am erhärteten Beton /Beton1/, /Heu2/, /Kin1/.

Ein wesentlicher Vorteil des Beton ist seine beliebige Formbarkeit. Nach dem Erhärten zeigt die Oberfläche den Schalungsabdruck, wodurch diverse Gestaltungsmöglichkeiten gegeben sind. Die einfachste und bekannteste Variante stellen sägerauhe oder gehobelte Brettstrukturen dar. Auch die Verwendung von Strukturmatrizen aus Kunststoff ermöglicht vielfältige Oberflächenstrukturen. Eine Renaissance erlebten Sichtbetonoberflächen in den letzten Jahren durch Verwendung spezieller Stahlschalungen.

Wesentlich aufwendiger und daher seltener ist die nachträgliche Bearbeitung der erhärteten Betonoberfläche. Manuelle steinmetzmäßige Bearbeitungstechniken sind z.B. Bossieren, Stocken, Spitzen oder Scharrieren. Maschinelle Verfahren sind z.B. Strahlverfahren wie Flamm- oder Sandstrahlen, Sägen, Schleifen und Polieren /Kin1/, /Lam1/.

Anfang der sechziger Jahre begann sich sehr schnell der Waschbeton durchzusetzen, da das Auswaschen eine einfache, wirtschaftliche und auch optisch vielfältige Oberflächenbearbeitung darstellt. Vielfältige gestalterische Möglichkeiten bietet die Variation von Farbe und Kornform der Zuschläge oder die Verwendung pigmentierter oder Weißzemente /Beton1/, /Feh1/, /Grü1/, /Gud1/, /Heu1/, /Kin1/, /Schm1/.

Die Herstellung von Waschbetonbauteilen erfolgt heutzutage überwiegend im Betonfertigteilwerk. Unterschieden wird zwischen dem "Positivverfahren" bei dem die auszuwaschende Oberfläche frei liegt und dem "Negativverfahren", bei dem der Waschbetonzuschlag und somit die auszuwaschende Fläche unten in der Schalung liegt.

Heutzutage wird überwiegend das "Negativverfahren" angewendet, da die Auswaschtiefe einfacher und präziser zu steuern und einzuhalten ist. Hierbei wird ein Kontaktverzögerer auf die Schalung aufgetragen, der Zuschlag eingebracht und darauf der Vorsatzbeton betoniert. Die durch Verwendung von Kontaktverzögerern nicht erhärtete Feinmörtelschicht zwischen den oberflächennahen Zuschlagkörnern wird in jungem Alter mittels Wasser-, Druckwasserstrahlen oder Bürsten entfernt. Abhängig vom Verfahren bzw. vom verwendeten Kontaktverzögerer sind nahezu beliebige Auswaschtiefen möglich.

Für vorgefertigte Bauteile aus Beton mit werksteinmäßig bearbeiteter oder besonders gestalteter Oberfläche gilt DIN 18 500. In Abhängigkeit von der Auswaschtiefe unterscheidet die DIN verschiedene Auswascharten:

- "ausgewaschen" bezeichnet eine Oberfläche, von der die oberste Feinmörtelschicht in einer Tiefe von mehr als 2 mm entfernt wurde (s. Abb. 1)
- "feingewaschen" bezeichnet eine Oberfläche von der die oberste Feinmörtelschicht bis zu einer Tiefe von maximal 2 mm entfernt wurde (s. Abb. 2)



Abb. 1: Ausgewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 6 mm

Begrenzt wird die Rauhtiefe durch die Korngröße der oberflächennahen Zuschläge, da diese trotz des Auswaschens noch fest im Beton verankert bleiben müssen. Nach oben sind der Auswaschtiefe nahezu keine Grenzen gesetzt. Für Tiefen > 50 mm wird das Sandbettverfahren angewendet, bei dem die groben Kiesel vor dem Betonieren in der Schalung in ein Sandbett eingelegt werden, um nicht vollständig von Beton umhüllt zu werden (s. Abb. 3). Zur Vermeidung karbonatisierungsbedingter Korrosion ist daher die Betonüberdeckung der Bewehrung unbedingt um die Auswaschtiefe zu erhöhen.



Abb. 2: Feingewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 2 mm



Abb. 3: im Sandbettverfahren ausgewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 50 mm

Vielfältigste Möglichkeiten zur Gestaltung von Waschbetonoberflächen sind also durch Variation des oberflächennahen Zuschlages möglich. Auch die Verwendung unterschiedlicher großer, runder oder gebrochener, heller oder dunkler, ein- oder mehrfarbiger Zuschläge verändert maßgeblich das Erscheinungsbild. Um den wirtschaftlichen Einsatz hochwertiger Zuschläge zur Erzielung des gewünschten Farb- oder Struktureffekts an der Oberfläche zu ermöglichen, sind Waschbetonbauteile i.d.R. zweischichtig aufgebaut. Sie bestehen aus der zumeist unbewehrten Waschbetonvorsatzschicht, auf die der tragende Kernbeton "frisch in frisch" aufbetoniert wird.

Weiteren Spielraum für die Oberflächengestaltung bietet der Zement, so ist durch die Verwendung von Weißzementen oder Farbpigmenten eine vollständige Durchfärbung des Vorsatzbetons möglich.

Die wichtigsten Anforderungen an Werkstoffe und Verfahrensweisen zur Herstellung von Waschbetonbauteilen sind in /Lam1/ und /Pör1/ zusammengefaßt.

2.2 URSACHEN UND MECHANISMEN VON STAHLBETONoberFLÄCHENSCHÄDEN

Das große Ausmaß an Stahlbetonschäden und der damit verbundene volkswirtschaftliche Schaden machten intensive Forschungsarbeiten zu Ursachen und Mechanismen von Stahlbetonschäden erforderlich. Inzwischen gelten sie als weitestgehend geklärt und sind in diversen Arbeiten (vgl. z.B. /Bag1/, /Bak1/ /Bun1/, /Bier1/, /Fre1/, /Fun1/, /Ger1/, /Knö1/, /Kro1/, /Nei2/, /Reh1/, /Rös1/, /Schi1/, /Schol1/, /Schr1/, /Wal2/, /Web1/ /Wis1/, /Wis2/) dokumentiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher nur die für das Verständnis notwendigen Zusammenhänge karbonatisierungsbedingter Stahlbetonschäden skizziert.

Durch das bei der Hydratation entstehende Kalziumhydroxid ist das Porenwasser im Beton hochalkalisch und weist einen pH-Wert $> 12,5$ auf. In diesem pH-Bereich bildet sich eine Passivschicht auf der Stahloberfläche und der Korrosionsabtrag wird vernachlässigbar gering. Unter Karbonatisierung wird die Reaktion des im Porenwasser des Betons enthaltenen Kalziumhydroxids ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) mit dem in der Luft enthaltenen Kohlendioxid (CO_2) zu Kalkstein (CaCO_3) und der daraus resultierende Abbau der Alkalität des Betons verstanden /Wal1/.



Durch die Karbonatisierung sinkt der pH-Wert des Betons auf $\text{pH} < 9$ und es ändern sich Struktur und wesentliche Eigenschaften der Betonoberfläche. So werden z.B. Steigerungen der Druckfestigkeit zwischen 40 und 120 % in Abhängigkeit von der Zementart festgestellt. Weiterhin verringert die Karbonatisierung die Gesamtporosität der Betonoberfläche, da der sich bildende Kalkstein ein größeres Volumen im Porenraum einnimmt /Bier1/, /Bun1/, /Kro1/.

Erreicht die Karbonatisierungsfront den Bewehrungsstahl, geht die stabile Passivschicht auf der Bewehrung in diesem Bereich verloren. Da bei frei bewitterten Betonbauteilen ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff vorhanden sind, werden alle erforderlichen Voraussetzungen für Korrosion erfüllt /Ker1/. Die auftretenden Spannungen, welche durch die Volumenzunahme der sich bildenden Korrosionsprodukte verursacht werden, lösen dann aufgrund der mangelnden Zugfestigkeit des Betons die bekannten Abplatzschäden auf der Betonoberfläche aus /Nei2/.

Haupteinflüsse auf die Karbonatisierung sind folgende Faktoren /Bun1/, /Lul1/, /Knö2/, /Nei2/, /Nis1/:

- Umweltbedingungen (CO₂-Gehalt der Luft, relative Luftfeuchte, Bewitterung)
- Betonzusammensetzung (Zementgehalt, -art, Wasserzementwert)
- Verarbeitung (Verdichtung, Nachbehandlung)
- Zeit (Abnahme des Karbonatisierungsfortschritts mit dem Betonalter (s. Abb. 4))

Am größten ist der Karbonatisierungsfortschritt bei relativen Luftfeuchten von 50-70 %. Unter Wasser und bei relativen Luftfeuchten unter 30 % ist er nahezu Null. Im "Freien unter Dach", also regengeschützt, ist er 2-3 mal höher, als im "Freien ungeschützt", da wassergefüllte Poren die Karbonatisierung stark behindern. Erhöhte Temperaturen und CO₂-Gehalte der Luft, z.B. Industrie-, oder Stadtatmosphäre beschleunigen die Karbonatisierung. Ein niedriger Wasserzementwert sowie sorgfältige Verdichtung und Nachbehandlung und die damit verbundene geringe Porosität des Zementsteins verlangsamen den Karbonatisierungsfortschritt. Das gilt auch bei einem hohen Zementgehalt, vorzugsweise an Portlandzement, der bei der Hydratation viel Kalziumhydroxid bildet.

Unter Anwendung des 1. Fick'schen Gesetzes gilt nach den Diffusionsgesetzen für den Karbonatisierungsfortschritt folgende Beziehung /Bun1/, /Klei1/, /Mey1/, /Star1/:

$$dm = \frac{D' \times F (k_0 - k)}{s} \times t$$

dm = Menge des in der Zeit dt durch die Oberfläche der Probe diffundierten CO₂

D' = effektiver Diffusionskoeffizient des CO₂ im karbonatisierten Beton [mm²/a]

F = Probenoberfläche, durch die das CO₂ diffundiert

k₀-k = Konzentration des CO₂ an der Probenoberfläche und in der Adsorptionszone

s = Dicke der karbonatisierten Betonschicht [mm]

t = Zeit [a]

$$dm = m_0 \times F \times s$$

m₀ = Masse des CO₂, die je Volumeneinheit des Betons adsorbiert wird

$$m_0 \times F \times s = \frac{D' \times F (k_0 - k)}{s} \times t$$

nach Integration

$$\frac{s^2}{2} = \frac{D' \times (k_0 - k)}{m_0} \times t$$

bei $k = 0$

$$c = \sqrt{\frac{2D' \times k_0}{m_0}}$$

c = Karbonatisierungskoeffizient in $[\text{mm/a}^{1/2}]$

$$s = \sqrt{\frac{2D' \times k_0}{m_0}} \times t$$

$$s = c \times \sqrt{t}$$

Die Karbonatisierungstiefe s wächst anfangs schnell, später langsamer, da das gebildete Kalziumkarbonat die Poren verstopft. Der Karbonatisierungskoeffizient c ist eine für einen bestimmten Beton unter bestimmten Umweltbedingungen charakteristische Größe /Kro1;/ /Scho1/.

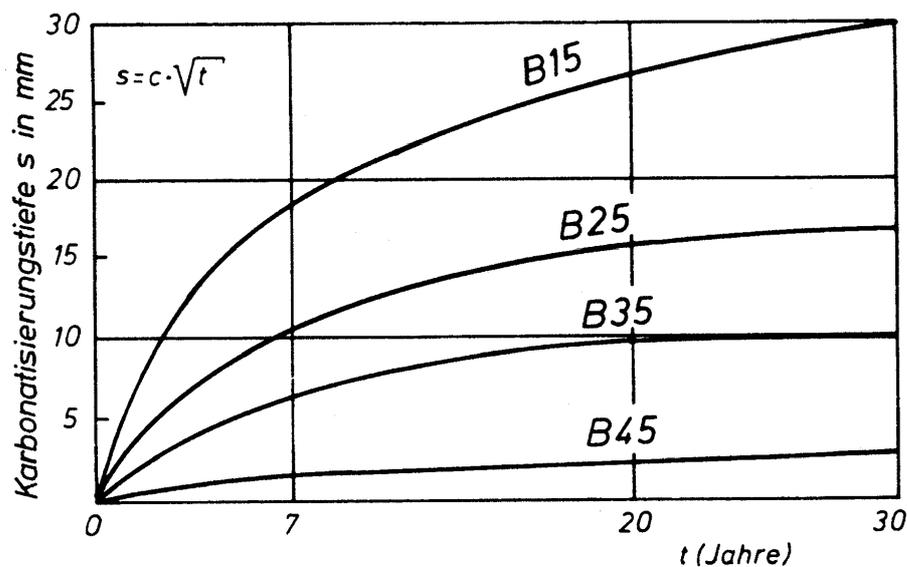


Abb. 4: Karbonatisierungsverlauf von Beton (im "Freien unter Dach") nach /Scho1/

Der Verlauf der Karbonatisierung in Abb. 4 verdeutlicht, daß Betonoberflächenschäden nur dann auftreten, wenn durch planungs- oder ausführungsbedingte Mängel die Betonqualität schlecht oder die Betonüberdeckung der Bewehrung zu gering ist. Wird bei der Herstellung von Betonbauteilen die vorgeschriebene Betonqualität und eine Überdeckung größer als die zu erwartende Karbonatisierungstiefe eingehalten, ist sicher gewährleistet, daß die Karbonatisierungsfront den Bewehrungsstahl nie erreicht /Nei1/, /Schuh1/.

Aufgrund identischer Schadensursachen und –mechanismen treten die vorgenannten karbonatisierungsbedingten Schäden auch an strukturierten oder ausgewaschenen Betonbauteilen in gleichem Maße auf.

Neben diesen typischen Oberflächenschäden lassen sich an Waschbetonoberflächen weitere Schäden bzw. Mängel beobachten:

- erhöhte Verschmutzungsneigung

Ein besonderes Schadensbild strukturierter oder ausgewaschener Betonoberflächen ist eine aufgrund der Rauheit erhöhte Verschmutzungsneigung der Fassaden. Insbesondere bei Waschbetonbauteilen mit weißen Zuschlägen und Weißzement wird dies häufig als Mangel angesehen (s. Abb. 5). Zusätzlich erschwert die Rauheit den Wasserablauf der Fassade. Abb. 6 zeigt den Befall mit Mikroorganismen, der durch Verschmutzungen in Verbindung mit Feuchtigkeit begünstigt wird.



Abb. 5: Verschmutzung einer weißen Waschbetonfassade



Abb. 6: Befall mit Mikroorganismen an einer Waschbetonfassade

- Herausfallen oberflächennaher Zuschläge

Einen spezifischen Mangel stellt an Waschbetonbauteilen das Herausfallen der oberflächennahen Zuschläge aufgrund mangelnder Einbindung in den Beton dar. Ursachen sind z.B. die Auswahl einer für das Auswaschverfahren ungeeigneten Sieblinie oder die Erosion des oberflächennahen Betons aufgrund mangelnder Festigkeit.

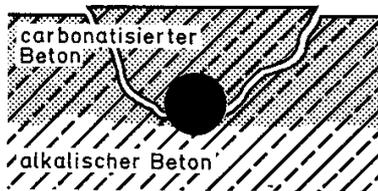
2.3 SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON STAHLBETONoberFLÄCHEN

Das massive Auftreten von Schäden an Stahlbetonoberflächen ab den siebziger Jahren führte zu intensiver Forschung über deren Ursachen, Beseitigung und Vermeidung /Bag1/, /Gro1/, /Gru2/, /Ker1/, /Kor1/, /Kwa1/, /Iva1/, /Nei3/, /Öch2/, /Reu1/, /Rie2/, /Ruf1/, /Sas1/, /Schul1/, /Seml1/, /Vol1/ und mündete u.a. in der Einführung umfangreicher Regelwerke.

Mit den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen "ZTV-SIB" des Bundesministers für Verkehr /BMV1/ und der Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen "Rili-SIB" des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton /DAfStb1/ existieren Regelwerke, in denen Anforderungen an Verfahren, Personal und Werkstoffe zur Betoninstandsetzung festgelegt sind.

2.3.1 VERFAHRENSWEISE DER STAHLBETONINSTANDSETZUNG

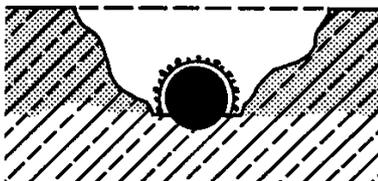
Folgende Verfahrensweise gilt zur Instandsetzung üblicher Stahlbetonschäden als wissenschaftlich abgesichert und Stand der Technik /Gru2/, /Lu11/:



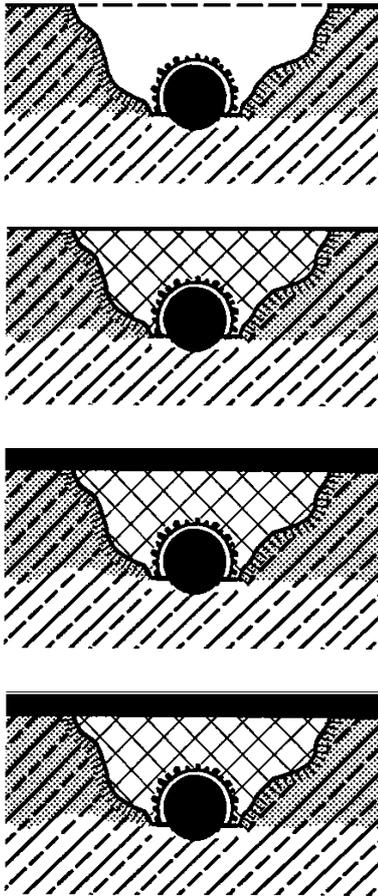
1. Aufsuchen und Freilegen aller erkennbaren Schadstellen bis auf den tragfähigen Beton und ggf. der korrodierten Bewehrungsstäbe



2. Entrosten der freigelegten Bewehrungsstäbe metallisch blank (Reinheitsgrad Sa 2 1/2 nach DIN 55 928) und Reinigen der Reparaturflächen von verbundmindernden Bestandteilen, i.d.R. durch wasservernebelte Strahlverfahren mit festem Strahlgut



3. Korrosionsschutz der entrosteten Bewehrung durch Beschichtungen



4. Auftragen einer Haftbrücke zur Verbesserung des Verbundes zwischen Altbeton und nachfolgendem PCC-Mörtel
5. Reprofilieren der Ausbruchstelle mit PCC- oder SPCC-Mörteln, "frisch in frisch" mit der Haftbrücke
6. Schließen von Poren und Lunkern und Egalisierung des Untergrundes mit PCC-Spachtel
7. Karbonatisierungs- und Feuchteschutz durch Auftragen einer mehrlagigen Beschichtung

Abb. 7: Verfahrensweise zur Instandsetzung von Stahlbetonoberflächenschäden

Von besonderer Bedeutung für die dauerhafte Schutzfunktion einer Instandsetzungsmaßnahme sind auch die Arbeitsschritte 6 und 7, also das Auftragen von Oberflächenschutzsystemen. Insbesondere das Fernhalten von Wasser als Korrosionsauslöser und bevorzugtem Transportmittel von Schadstoffen sowie von gasförmigem Kohlendioxid, das für den Abbau der Alkalitätsreserve verantwortlich ist, sind die zentralen Aufgaben der Oberflächenschutzsysteme für Stahlbetonoberflächen. Um diese Aufgaben verlässlich und mit definierter Schutzwirkung erfüllen zu können, müssen Polymerbeschichtungen geschlossene Filme mit vorgegebener Mindestdicke sicherstellen /Klo2/, /Nei4/, /Ste1/, /Öch1/, /Rie1/.

2.3.2 INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE

Neben der Verfahrensweise zur Instandsetzung von Stahlbetonoberflächenschäden sind in den Regelwerken /BMV1/, /DAfStb1/ auch umfangreiche Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe festgelegt. So stehen heute hochwirksame Schutz- und Instandsetzungswerkstoffe zur Verfügung, die durch aufwendige Eignungs- und Güteprüfungen eine gleichbleibende Qualität sowie definierte Eigenschaften gewährleisten.

Bei allen mineralischen Werkstoffen der Arbeitsschritte 1-6 (vgl. Kap. 2.3.1) handelt es sich um polymermodifizierte, zementgebundene Materialien, deren Materialbasis i.d.R. identisch ist. Die Unterschiede zwischen Korrosionsschutz, Haftbrücke und PCC- Mörtel bzw. PCC-Spachtel liegen hauptsächlich in einer unterschiedlichen Sieblinie der Zuschläge sowie der Konsistenz, d.h. der Wasserzugabemenge.

Gemäß den Vorgaben der Regelwerke sind PCC-Mörtel (polymer-cement-concrete) werkgemischte Trockenmörtel aus Portlandzement nach DIN 1164, Zuschlaggemischen mit Größtkorn ≤ 4 mm (PCC-Spachtel ≤ 1 mm) nach DIN 4226, ggf. Zusatzstoffen (z.B. Traß oder Steinmehl) und Zusatzmitteln (Betonverflüssiger, Erstarrungsverzögerer) nach DIN 1045 und der Polymerkomponente in Form von redispergierbaren Kunstharzpulvern /Gru2/.

Kunststoffdispersionen sind Zweiphasensysteme, bei der die festen Partikel, in diesem Falle die Makromoleküle des Kunststoffs, die innere Phase bilden. Sie liegen feinverteilt (dispergiert) in dem die äußere Phase bildenden Wasser vor. PCC-Mörtel sind charakterisiert durch simultane Zementhydratation und Filmbildung der Dispersion, wobei im allgemeinen die Hydratation der Filmbildung vorausgeht. Der Erhärtungsprozeß läßt sich wie folgt beschreiben /Nae1/, /Bro1/:

Beim Anmischen des frischen Mörtels mit Wasser entsteht die Kunststoffdispersion in situ im Baustoff, die Zementhydratation setzt ein und die wäßrige Phase wird mit Kalziumhydroxid gesättigt. Die Polymerteilchen setzen sich in diesem Stadium an der Oberfläche der entstehenden Gelteilchen und des unhydratisierten Zements ab. Infolge der Entstehung der Zementgelstruktur nimmt die Porosität des Systems rapide ab. Dabei werden die Polymerteilchen in die Kapillarporen abgedrängt und bilden dort eine kontinuierliche dichtgepackte Schicht an der Oberfläche des Zementgels aus, die Poren werden so mit den Polymerteilchen ausgefüllt. Wird der Dispersion das Wasser entzogen, verkleben die Kunststoffteilchen miteinander und bilden schließlich einen zusammenhängenden Film, der den ganzen Zementstein in Form von stegartigen Brücken oder porösen Polymermembranen durchdringt. Ein zusammenhängendes Mikrogerüst entsteht allerdings erst bei einem Kunststoff/Zement-Wert von 0,06. Bei PCC-Mörteln liegt der K/Z-Wert in der Regel zwischen 0,01 und 0,2.

Durch die Polymermodifikation werden mehrere Eigenschaften der zementgebundenen Materialien positiv verändert /Nae1/:

- Reduzierung des Wasserzementwertes um bis zu 20 % bei gleicher Verarbeitbarkeit
- Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens
- stark erhöhte Haft- und Klebwirkung
- verringerte Gefahr der Wasserabsonderung und Entmischung
- höhere Biegezugfestigkeit, niedriger Elastizitätsmodul
- geringeres Schwindmaß
- verbesserte Beständigkeit (z.B. gegen Tausalz) durch dichteres Gefüge

Auch bei der abschließenden Oberflächenschutzbeschichtung des Arbeitsschrittes 7 (vgl. Kap. 2.3.1) kommen i.d.R. Kunststoffdispersionen zum Einsatz, die als Dispergiermittel Wasser und als disperse Phase thermoplastische Polymere (i.d.R. Acryl- oder Methacrylatharze) mit einer Teilchengröße zwischen 0,1 und 5 µm enthalten. Weiterhin enthalten Dispersionen farbgebende Pigmente, Füllstoffe zur Verbesserung rheologischer Eigenschaften und Additive wie z.B. Dispergierhilfsmittel oder Konservierungsstoffe. Der Dispersion können Tenside und Schutzkolloide zugesetzt sein, durch die die Kunststoffteilchen voneinander fern und in der Schwebe gehalten werden, so daß sie sich im Gebinde weder verkleben noch absetzen können. Aufgrund der Tenside ist die Zugabe von Entschäumern erforderlich, die das Schäumen während des Aufrührens vermeiden /Nae1/, /Bro1/.

Die Bildung eines geschlossenen Beschichtungsfilms auf der Oberfläche beginnt mit der Aggregation der dispergierten Teilchen durch Wasserentzug. Die reversible Aggregation geht infolge des fortschreitenden Wasserverlusts in die irreversible Agglomeration der Teilchen über. Sobald sich die Teilchen berühren, bilden sich Flüssigkeitsmenisken durch Verdunsten des Wassers an der Filmoberfläche. Diese Menisken üben einen Druck auf die Teilchen aus, der diese zusammenpreßt. Bei hinreichend großem Druck werden die thermoplastischen Polymerteilchen regelrecht verschweißt. Unter der Einwirkung des Kapillardruckes diffundieren die freien Enden der Makromoleküle über die Grenzflächen der Einzelteilchen ineinander, wodurch eine innige, jedoch keine chemische Verbindung entsteht /Nae1/.

Maßgebend für die Filmbildung einer Dispersion sind die Witterungsbedingungen. Unterhalb der Mindestfilmbildungstemperatur, die bei Baudispersionen i.d.R. bei + 5°C liegt, trocknen Dispersionen zu einer nicht zusammenhängenden pulverigen Masse. Auch bei Regen, d.h. einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre ist keine Filmbildung möglich, da das Wasser nicht verdunsten kann /Nae1/, /Bro1/.

Eine weitere Form der Oberflächenschutzbeschichtungen sind die lösemittelhaltigen Beschichtungen, bei denen der Kunststoff vollständig im Lösungsmittel gelöst vorliegt. Nach der Applikation verdunstet das Lösungsmittel, die Kunststoffteilchen fließen ineinander und bilden einen dichten Film auf der Bauteiloberfläche. Aufgrund der Gefahren für Mensch und Umwelt ist die Verwendung lösemittelhaltiger Beschichtungen stark zurückgegangen.

2.4 SCHICHTDICKEN VON OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEMEN

Wie in Kapitel 2.3 erläutert setzen sich Oberflächenschutzsysteme aus dem PCC-Spachtel zur Schaffung eines ebenen Untergrunds, ggf. einer Hydrophobierung und einer Grundierung, sowie der mindestens zweilagigen Beschichtung zusammen.

Neben den Grundanforderungen an Oberflächenschutzsysteme für Fassaden wie licht-, UV- und Alkalibeständigkeit, ggf. einer geringen Rißüberbrückungsfähigkeit sowie einer guten Haftung am Untergrund, werden zur Gewährleistung einer dauerhaften Schutzwirkung in den Regelwerken /BMV1/, /DAfStb1/ noch eine Vielzahl weiterer Anforderungen formuliert, die in den Tabellen Tab. 1 und Tab. 2 zusammengefaßt sind.

Tab. 1: Anforderungen der Regelwerke an ausgewählte Oberflächenschutzbeschichtungen

Systembezeichnung der Oberflächenschutzbeschichtungen		Richtwerte für systemspezifische Mindestschichtdicke $d_{\min s}$		Ausreichender Kohlendioxidwiderstand sd_{CO_2}	Ausreichende Wasserdampfdurchlässigkeit sd_{H_2O}
RiLi-SIB	ZTV-SIB	Rili-SIB	ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB
OS 1 Hydrophobierende Imprägnierung	OS-A Hydrophobierung	-	-	-	-
OS 2 Versiegelung für nicht befahrbare Flächen		50 μm	-	$\geq 50 \text{ m}$	$\leq 4 \text{ m}$
OS 3 Versiegelung für befahrbare Flächen		50 μm	-	$\geq 50 \text{ m}$	$\leq 4 \text{ m}$
	OS-B Beschichtung für nicht befahrbare Flächen	-	80 μm	$\geq 50 \text{ m}$	$\leq 4 \text{ m}$
OS 4 Beschichtung für nicht befahrbare Flächen	OS-C Beschichtung mit erhöhter Dichtigkeit für nicht befahrbare Flächen	80 μm	80 μm	$\geq 50 \text{ m}$	$\leq 4 \text{ m}$
OS 5 b Beschichtung für nicht befahrbare Flächen mit mind. sehr geringer Rißüberbrückung	OS-D II Beschichtung mit mind. geringer Rißüberbrückungsfähigkeit für nicht befahrbare Flächen	300 μm	300 μm	$\geq 50 \text{ m}$	$\leq 4 \text{ m}$

Tab. 2: Anforderungen der Regelwerke an ausgewählte Oberflächenschutzbeschichtungen

Systembezeichnung		Reduzierung der Aufnahme von Wasser / wasserlöslicher Schadstoffe	Verbesserung des Frost- und Tausalzstandes	Dauerhafte Reißüberbrückung	Ausreichende Haftzugfestigkeit
RiLi-SIB	ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB	Rili-SIB / ZTV-SIB
OS 1 Hydrophobierende Imprägnierung	OS-A Hydrophobierung	+	+	-	-
OS 2 Versiegelung für nicht befahrbare Flächen		+	+	-	+
OS 3 Versiegelung für befahrbare Flächen		+	+	-	+
	OS-B Beschichtung für nicht befahrbare Flächen	+	+	-	+
OS 4 Beschichtung für nicht befahrbare Flächen	OS-C Beschichtung mit erhöhter Dichtigkeit für nicht befahrbare Flächen	+	+	-	+
OS 5 b Beschichtung für nicht befahrbare Flächen mit mind. sehr geringer Reißüberbrückung	OS-D II Beschichtung mit mind. geringer Reißüberbrückungsfähigkeit für nicht befahrbare Flächen	+	+	+	+

(+ = wird gefordert, - = keine Anforderung)

Entscheidend für die Erfüllung der Anforderungen, insbesondere für den Widerstand gegen Kohlendioxiddiffusion s_{dCO_2} , ist die Ausbildung eines geschlossenen Beschichtungsfilms auf der Oberfläche unter Einhaltung der systemspezifischen Mindestschichtdicke. Der Diffusionswiderstand s_d ist das Produkt der Diffusionswiderstandszahl der Beschichtung μ und der Schichtdicke d , hängt also unmittelbar von der Schichtdicke d ab /Lut1/.

$$s_d = \mu \times d \quad [m]$$

s_d = Diffusionswiderstand [m]
 μ = Diffusionswiderstandszahl [-], Materialkennwert
 d = Dicke der Beschichtung [m]

Der Diffusionswiderstand ist definiert als Dicke einer ruhenden Luftschicht in Meter, die den gleichen Diffusionswiderstand hat wie eine Beschichtung der Dicke d . Klopfer hat nachgewiesen, daß ein Diffusionswiderstand von $s_{d\text{CO}_2} \geq 50 \text{ m}$ den Karbonatisierungsfortschritt eines Betonbauteils i.d.R. so stark reduziert, als wäre eine Diffusionssperre für Kohlendioxid mit $s_{d\text{CO}_2} = \infty$ aufgetragen worden /Klo1/. Um andererseits die Wasserdampfdiffusion von innen nach außen (Austrocknung) nicht zu behindern, müssen derartige Beschichtungen gleichzeitig die Forderung $s_{d\text{H}_2\text{O}} \leq 4 \text{ m}$ erfüllen.

2.4.1 SCHICHTDICKENBESTIMMENDE EINFLUSSGRÖSSEN

Schichtdicken und deren Gleichmäßigkeit (Streuung) werden bei der Applikation auf Betonoberflächen von verschiedenen, oft unabhängig voneinander wirkenden Parametern beeinflusst:

a) Rheologische Eigenschaften des Beschichtungsmaterials

Naturgemäß beeinflussen die rheologischen Eigenschaften des flüssigen Beschichtungsmaterials die zu erwartende Schichtdicke, da jede Beschichtung ein Kompromiß zwischen dem Verlaufsvermögen, das von Fließfähigkeit und Oberflächenspannung der Flüssigkeit abhängig ist, und der Erzielung eines standfesten Naßfilms durch strukturviskoses Stoffverhalten darstellt /Eng1/.

b) Einfluß des Verarbeiters

Neben der Technik übt auch der ausführende Mensch, seine Erfahrung und sein handwerkliches Geschick, ggf. auch seine Motivation, einen wesentlichen Einfluß auf das Beschichtungsergebnis aus /Eng1/.

c) Applikationsverfahren

Das Applikationsverfahren wirkt sich sowohl auf die Schichtdicke als auch auf die Gleichmäßigkeit von Beschichtungen aus, wobei die größte Gleichmäßigkeit mit dem Airless-Spritzverfahren zu erzielen ist. Die Pinselapplikation ist durch die Pinselfurchen weniger gleichmäßig. Die größte Streuung weist die Rollenapplikation auf, hier tritt in Abhängigkeit vom Rollenflor der sog. "Orangenschaleneffekt" (s. Abb. 8) auf /Eng1/.

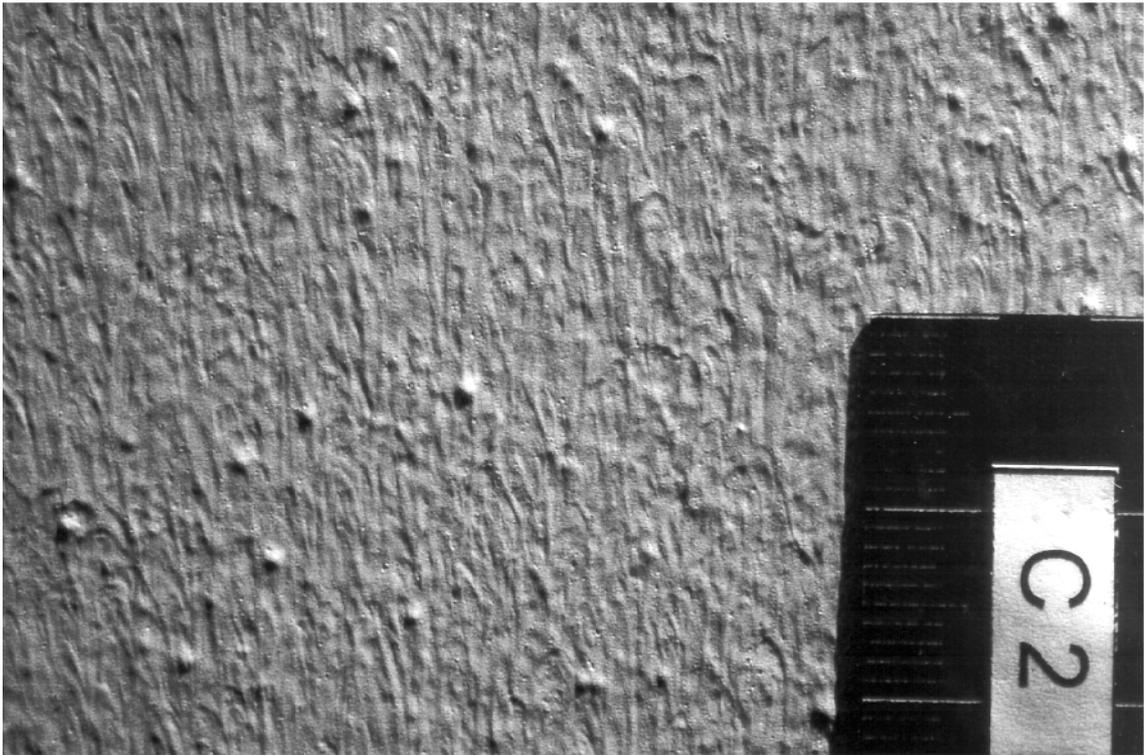


Abb. 8: "Orangenschaleneffekt" bei der Rollenapplikation einer Beschichtung

d) Rauheit der Oberfläche

Die Rauheit der Oberfläche beeinflusst maßgeblich Gleichmäßigkeit und Dicke von Beschichtungen. Naturgemäß ist die Schichtdicke um so größer, je mehr flüssiger Beschichtungsmittel pro m^2 aufgetragen wird. Zur Ermittlung der erforderlichen Auftragsmenge, wäre daher die Berechnung der tatsächlichen Oberfläche von Waschbetonoberflächen erforderlich. Hierfür wird in Anlehnung an /Eng1/ eine eigene Modellrechnung verwandt, bei der vereinfachend angenommen wird, daß die Zuschlagkörner Kugeln sind, die bis zur Hälfte in den Beton eingebunden sind, so daß der Radius die Rauhtiefe darstellt (s. Abb. 9).

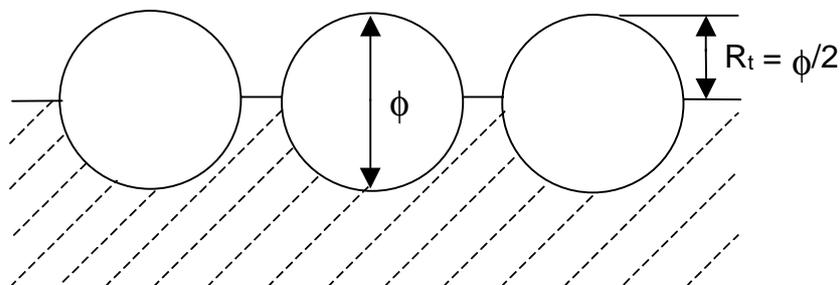


Abb. 9: Modell einer Waschbetonoberfläche mit kugelförmigen Zuschlägen

Es gilt: $A_{WB}^{\phi} = A + n \times A_{HK} - n \times A_P = A + n(A_{HK} - A_P)$

A_{WB}^{ϕ} = Waschbetonoberfläche mit Zuschlägen von mittl. Durchmesser ϕ

A = bezogene planebene Waschbetonoberfläche

n = Anzahl aus A herausragender Zuschläge

A_P = kreisförmige Projektionsfläche eines Zuschlages von ϕ (bei halber Einbettung) in A

A_{HK} = aus A herausragende Kugelfläche eines Zuschlages von ϕ (bei halber Einbettung). A_{HK} sind Halbkugeln mit $r = \phi / 2$

Daraus folgt mit

$$A_{HK} = \frac{F_{Kugel}}{2} = \frac{4\pi r^2}{2} = 2\pi r^2$$

$$A_P = F_{Kreis} = \pi r^2$$

endgültig $A_{WB}^{\phi} = A + n \times \pi \times r^2$

Unter Zugrundelegung dieser Modellrechnung erhöht sich z.B. die tatsächliche Oberfläche einer Waschbetonoberfläche mit einer mittleren Rauhtiefe von 3 mm und $n = 16.000$ Zuschlägen/m² (vgl. Abb. 18) um den Faktor 1,45 und einer Oberfläche mit einer Rauhtiefe von 6 mm und $n = 5000$ Zuschläge/m² (vgl. Abb. 33) um den Faktor 1,57. Die Auftragsmenge muß daher in Abhängigkeit von der jeweiligen Rauhtiefe um entsprechende Faktoren erhöht werden.

Die Folge der rauen Oberflächenstruktur für die Gleichmäßigkeit ist eine ausgeprägte Streuung der Schichtdicke, die durch eine hohe Standardabweichung der Meßergebnisse gekennzeichnet ist. Verursacht durch unterschiedliche Neigungswinkel, unterschiedlich gekrümmte Flächen, d.h. "Berge" und "Täler" der Waschbetonoberflächen, resultieren aus der Oberflächenspannung, der Fließfähigkeit und dem Applikationsverfahren der Beschichtung deutlich größere Streuungen der Schichtdicken als auf ebenen Oberflächen

2.4.2 VERFAHREN ZUR SCHICHTDICKENMESSUNG

Um die Funktionsfähigkeit und dauerhafte Schutzfunktion der Beschichtung zu gewährleisten, ist in den Regelwerken die stichprobenartige Güteüberwachung der Beschichtung u.a. durch Messung der Trockenschichtdicke vorgesehen. Im Gegensatz zu metallischen Untergründen, bei denen Schichtdicken magnetinduktiv bzw. nach dem Wirbelstromprinzip relativ einfach, zuverlässig und vor allem zerstörungsfrei meßbar sind, stehen derzeit für mineralische Untergründe nur zerstörende Meßverfahren zur Verfügung. Die ZTV-SIB /BMV1/ sieht folgende zerstörungsarme Meßverfahren vor:

- die Differenzdickenmessung mit dem Schichtdickenprüfgerät der Bundesanstalt für Materialprüfung, BAM, (in Anlehnung an DIN 50 933), bei dem die Beschichtung mit einer Meßsonde bis zum Untergrund durchstoßen wird
- das Keilschnittverfahren nach DIN 50 986, bei dem die Beschichtung mit einer Vorrichtung in definiertem Winkel eingeschnitten, die Projektion der Schnittflanke mikroskopisch gemessen und die Schichtdicke trigonometrisch berechnet wird

Die durch die Messung entstandenen Zerstörungen werden bei der Differenzdickenmessung als vernachlässigbar angesehen, beim Keilschnittverfahren sind sie relativ einfach auszubessern /BMV1/, /Eng1/.

Die zuverlässige Messung von Schichtdicken auf strukturierten oder ausgewaschenen Betonoberflächen ist mit den genannten Verfahren jedoch nicht möglich, da keine ausreichend großen ebenen Flächen für die Anwendung des Keilschnittverfahrens zur Verfügung stehen. Auch für die Anwendung des Differenzdickenmeßgerätes sind ebene Flächen Voraussetzung für die Differenzbildung (vgl. Abb. 10).

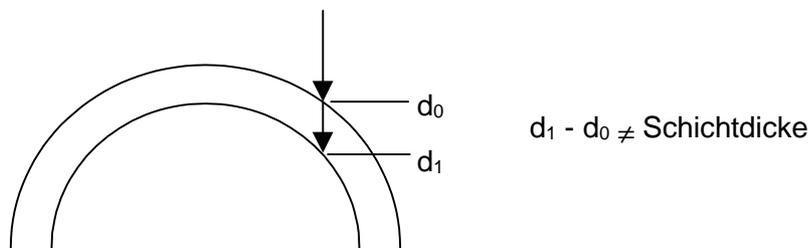


Abb. 10: Problem der Differenzdickenmessung auf der Oberfläche eines Zuschlagkorns

Als Meßverfahren kommt daher für strukturierte oder ausgewaschene Betonoberflächen nur die äußerst präzise Messung unter dem Auflicht-Mikroskop in Frage, was jedoch aufgrund der erforderlichen Entnahme von Bohrkernen und der arbeitsintensiven Präparation von polierten Anschliffen im Labor sehr aufwendig und daher für eine fortlaufende Güteüberwachung der Ausführungsqualität auf der Baustelle nicht geeignet ist. Sofern jedoch exakte Aussagen benötigt werden ist dieses sehr genaue Verfahren unerlässlich.

2.4.3 STATISTISCHE GRUNDLAGEN

2.4.3.1 Auswertung von Schichtdickenmessungen

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ist die Dicke einer Beschichtung von entscheidender Bedeutung für deren Funktionstüchtigkeit. Zumeist wird von der Schichtdicke nur als singulärem Wert gesprochen, bei der Messung treten jedoch in Abhängigkeit von Material, Verarbeiter, Applikationsverfahren und Untergrund (vgl. Kap. 2.4.1) eine Vielzahl verschiedener Schichtdickenmeßwerte auf. Zur Beurteilung der Ergebnisse sind daher statistische Auswertemethoden erforderlich.

Die Schichtdicke als zu untersuchende Eigenschaft wird statistisch als Merkmal bezeichnet. Da die Messung naturgemäß nicht alle Schichtdicken einer beschichteten Fläche umfassen kann, wird unter statistischen Gesichtspunkten an repräsentativen Stellen eine Anzahl Messungen durchgeführt, die als Stichprobe bezeichnet wird. Ist gewährleistet, daß Herstellung, Zusammensetzung und Verarbeitung des Materials gleich sind und die Stichprobennahme unter gleichartigen Prüfbedingungen erfolgt, kann man aus der Stichprobe Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit aller Schichtdicken schließen /Eng1/.

Im Bauwesen wird in der Regel davon ausgegangen, daß die Verteilung von Merkmalen (z.B. von Druckfestigkeiten) der Gauß'schen Normalverteilung folgt. Auch den Beurteilungskriterien der Regelwerke /BMV1/, /DAfStb1/, wie Anforderungen an Beschichtungen oder Auswertung von Schichtdickenmessungen, liegt die Annahme zugrunde, daß die Häufigkeitsverteilung von Schichtdicken grundsätzlich der Normalverteilung folgt. In /Eng1/ wird ebenfalls davon ausgegangen, daß Schichtdicken von Beschichtungen sich unter baupraktischen Bedingungen in Normalverteilungen anordnen. Abweichungen von der Gauß'schen Verteilung wie z.B. Schiefen oder mehrgipflige Verteilungen werden auf systematische Fehler in der Applikation oder der Meßwerterfassung zurückgeführt.

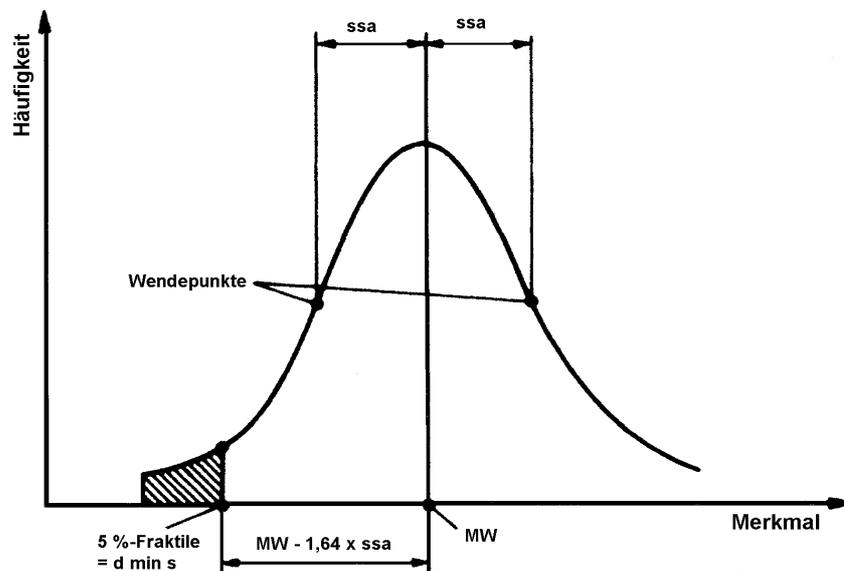


Abb. 11: Statistische Normalverteilung nach Gauß

Ein großer Vorteil der Anwendung der Normalverteilung liegt in der einfachen mathematischen Anwendung. Die erforderlichen Kennwerte zur Beurteilung des Merkmals "Schichtdicke" einer Beschichtung sind aus der Normalverteilung (s. Abb. 11) abzuleiten /Bie1/, /Sche1/:

- der Mittelwert MW teilt die Normalverteilung in ihrem Größtwert senkrecht zur Merkmalsachse in zwei form- und flächengleiche Hälften.
- die Standardabweichung ssa bezeichnet den Abstand der Wendepunkte vom Mittelwert. Sie beinhaltet 68 % der Fläche und dient zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit, die durch die Form des Häufigkeitsdiagramms beschrieben wird. Ein breites Häufigkeitsdiagramm mit großer Standardabweichung ssa entspricht einer ungleichmäßigen, ein schmales mit kleiner Standardabweichung dementsprechend einer gleichmäßigen Beschichtung
- die 5 % Fraktile, unter der 5 %, darüber 95 % aller Werte liegen.

Das entscheidende Beurteilungskriterium der ZTV-SIB (vgl. Tab. 1), die systemspezifische Mindestschichtdicke $d_{\min s}$, entspricht definitionsgemäß der 5 % Fraktile. Somit ist die Unterschreitung der systemspezifischen Mindestschichtdicke von 5 % der Meßwerte zulässig, bzw. 95 % müssen darüber liegen.

Die Ergebnisse des zweiten Untersuchungsschrittes (s. Kap. 3.3.4.7.2) gaben erste Hinweise, daß sich die Verteilung der Meßwerte nur bedingt mit der Gauß'schen Normalverteilung beschreiben lassen. Zur Feststellung, ob und wenn ja, wie sich die Verteilung der Daten mathematisch formulieren läßt, wurden die Daten daher u.a. mit dem Statistikprogramm SPSS untersucht. Dieses Statistikprogramm ermöglicht auch die Prüfung, ob und wenn ja, welcher Verteilungsart ein Datensatz bzw. eine Meßreihe zuzuordnen ist.

Die statistische Auswertung ergab, daß zur mathematischen Beschreibung der Verteilung der Meßreihen sowohl die in Kapitel 2.4.3.1 beschriebene Normalverteilung, als auch die Lognormal- und die Gammaverteilung, bei denen es sich jeweils um spezielle Formen rechtsschiefer Verteilungen handelt, in Frage kommen. Auf einen Teil der Meßreihen, die statistisch als "nicht parametrische" Verteilungen bezeichnet werden, läßt sich jedoch keine mathematische Verteilung anwenden.

Zur Prüfung der Einhaltung der Anforderungen der Regelwerke an die 5%-Fraktile erfolgte die Berechnung für die jeweilige Verteilung daher nach folgenden Verfahren:

- Normalverteilung

$$\beta_{5\%} = \bar{X} - 1,64 \times ssa$$

$$\text{mit } \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (\text{arithmetisches Mittel})$$

- Lognormalverteilung nach /Har1/

$$\beta_{5\%} = \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{\ln(X_i)}{n} - 1,64 \times ssa(\ln(X_i))\right)$$

- Gammaverteilung nach /Kot1/

$\beta_{5\%}$ berechnet mit der IDF-Funktion

$$\beta_{5\%} = IDF.gamma(0,05, \hat{k}, \frac{1}{\hat{\theta}})$$

$$\text{mit } \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (\text{arithmetisches Mittel})$$

$$\tilde{X} = \left(\prod_i X_i\right)^{1/n} \quad (\text{geometrisches Mittel})$$

$$M = \ln \frac{\bar{X}}{\tilde{X}}$$

$$\hat{k} = \frac{(0,5000876 + 0,1648852M - 0,0544276M^2)}{M} \quad \text{für} \quad 0 \leq M \leq 0,5772$$

$$\hat{k} = \frac{8,898919 + 9,059950M + 0,9775373M^2}{M(17,79728 + 11,968477M + M^2)} \quad \text{für} \quad 0,5772 \leq M \leq 17$$

$$\hat{k} = \frac{1}{M} \quad \text{für} \quad M > 17$$

$$\hat{\theta} = \frac{\bar{X}}{\hat{k}}$$

- nicht parametrische Verteilung nach /Sac1/

$\beta_{5\%}$ berechnet aufgrund der empirischen Verteilungsfunktion

$$Fn_{(X)} = \frac{1}{n} \times \text{Anz. } X_i \leq X$$

2.4.3.2 Darstellung von Schichtdickenverteilungen

Die im Bauwesen übliche grafische Darstellung von Häufigkeitsverteilungen zeigt Abb. 11 am Beispiel der Gauß'schen Normalverteilung.

Zur Gegenüberstellung einer größeren Anzahl von Verteilungen ist diese Darstellungsform aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit weniger geeignet. Ein weiterer Nachteil ist, daß beim Vergleich von Verteilungen die Darstellung statistischer Größen wie Mittelwert oder Fraktile nicht möglich ist. Eine in der Statistik gebräuchliche Variante der Darstellung von Verteilungen sind die in Abb. 12 gezeigten Boxplots, die grafische Kurzinformationen über die wichtigsten Daten einer Verteilung geben. Diese Darstellungsform wird daher im folgenden kurz erläutert.

Die Box im Boxplot erstreckt sich vom ersten bis zum dritten Fraktile der Daten, d.h. 50 % aller Daten fällt in die Box. Der Median, der mit einer Linie in der Box gekennzeichnet ist, ist die mittlere Beobachtung, d.h. 50 % der Werte sind kleiner und 50 % sind größer. Gegenüber dem Mittelwert hat der Median den Vorteil, daß er nicht von Ausreißern beeinflusst wird. Anhand der Lage des Medians innerhalb der Box kann man z.B. Schiefen der Verteilung sehr gut erkennen. Die Federbalken ("Whiskers", übersetzt: "Barthaare bei Katze oder Hund") sind die Ausläufer in den extremen Fraktile der Daten. Diese erstrecken sich über das 1,5-fache des Fraktileabstandes.

Alle Datenpunkte, die weiter als das "Whisker"-Ende von der Box entfernt sind, werden als Ausreißer bzw. Extremwerte gekennzeichnet. Diese Punkte werden dann mit "o" bezeichnet, wenn sie weiter als das 1,5fache, und mit "x" , wenn sie mehr als das 3fache des Fraktilabstandes außerhalb der Box liegen /SPSS1/.

Mit dieser Darstellungsform bekommt man einen Eindruck von dem Verlauf der einzelnen Variablen, aber am wichtigsten ist der Vergleich vieler Verteilungen, der mit Hilfe der Boxplots sehr anschaulich ermöglicht wird. In dieser Arbeit wird daher bei der Darstellung von Schichtdickenergebnissen auf die anschaulichen Boxplots zurückgegriffen.

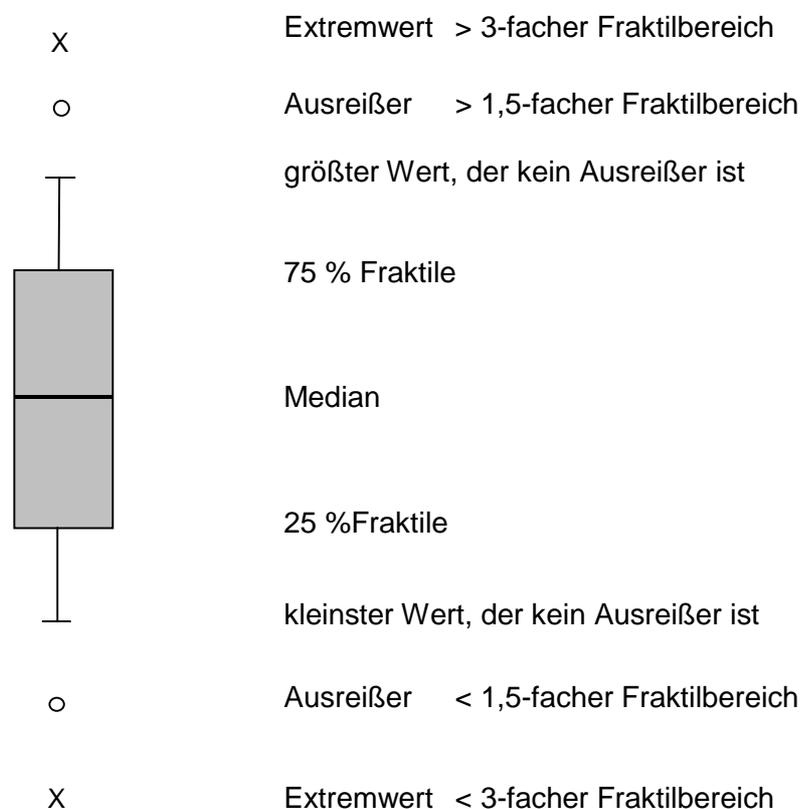


Abb. 12: Erläuterung der Darstellung von Boxplots

2.5 SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON WASCHBETONOBERFLÄCHEN

2.5.1 STAND DER TECHNIK

Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab für Schutz und Instandsetzung ausgewaschener oder strukturierter Betonoberflächen, abgesehen von wenigen Industrieveröffentlichungen /Beton2/, /Bri1/, /Bur1/, /Lin1/, /Mic1/, /Mic2/ /Mic3/, /Schü1/ keine durch wissenschaftliche Untersuchungen abgesicherten Erkenntnisse.

Die Befragung 20 namhafter deutscher Hersteller für Instandsetzungswerkstoffe zeigte, daß nur wenig Erfahrungen zur Instandsetzung geschädigter Waschbetonoberflächen vorlagen, die überwiegend auf Einzelobjekten oder Probeflächen beruhten. Nach Angaben der Hersteller erscheint die Ausführung einer Instandsetzungsmaßnahme, mit der der Verlust der Waschbetonstruktur verbunden ist, relativ unproblematisch. In einem Fall wurde als zusätzlicher Arbeitsgang noch ein Glasgittergewebe eingearbeitet, um die rißfreie Erhärtung des Mörtels auch bei hohen Schichtdicken sicher zu gewährleisten /Bri1/.

Als schwieriger und im Ergebnis problematisch erwies sich ein Vorgehen, das den weitgehenden Erhalt der Waschbetonfassade vorsah. Zum Einbinden loser Zuschläge war eine flächige Spachtelung mit PCC-Mörtel durchgeführt worden. Als besonders schwierig erwies sich die Freilegung der Waschbetonstruktur durch Auswaschen des Mörtels mit Bürste oder Schwamm. Da der Erhärtungsgrad schwer festzustellen war, wurde entweder zuviel oder zuwenig Material entfernt. Aufgrund zurückbleibender Zementschleier (vgl. Abb. 13) mußten die Waschbetonzuschläge nachträglich noch mit Steinreiniger behandelt werden /Mic1/, /Mic2/.

Nach der Erhärtung des Mörtels traten zusätzlich ausgeprägte Farbtondifferenzen zwischen den einzelnen Bauteilen auf, die nicht mit einer lasierenden Beschichtung ausgeglichen werden konnten. Daher war vor dem Auftragen der farblosen Beschichtung zusätzlich noch eine Beschichtung mit Mineralfarben erforderlich.

Ein weiteres ausgeführtes Instandsetzungskonzept sah den Erhalt der Waschbetonstruktur durch Applikation einer farblosen / lasierenden Beschichtung OS-C / OS 4 unter Verzicht auf die Reduzierung der Rauhtiefe mittels PCC-Mörtel /- Spachtel vor /Schü1/. Abb. 14 zeigt jedoch, daß die Ausbildung eines geschlossenen Films vorgegebener Dicke auf rauen Oberflächen nur bedingt möglich und somit kein dauerhafter Schutz des Bauwerks vor weiteren Schäden gewährleistet war.



Abb. 13: Zementschleier auf den Zuschlägen nach dem Auswaschen



Abb. 14: Fehlstellen in einer lasierenden Waschbetonbeschichtung

Systematische Untersuchungen instandgesetzter Waschbetonfassaden existieren nicht. Bei den Werkstoffen wurde auf die üblichen Instandsetzungswerkstoffe für Stahlbeton zurückgegriffen. Zwei Hersteller boten zusätzliche, spezielle Waschbeton-Beschichtungen an, zu deren Eignung und Schutzfunktion jedoch keine Erfahrungen vorlagen.

2.5.2 INSTANDSETZUNGSVARIANTEN

Wie im Kapitel 2.3 erläutert, sind Verfahrensweisen und Werkstoffe für Schutz und Instandsetzung glatter Betonoberflächen gemäß den geltenden Normen und Richtlinien intensiv wissenschaftlich untersucht und inzwischen hinreichend in der Praxis bewährt.

Da die Schadensbilder und –mechanismen strukturierter Betonoberflächen naturgemäß identisch sind mit denen glatter Oberflächen, erfolgt auch die Grobinstandsetzung der Schäden entsprechend der Verfahrensweisen in Kapitel 2.3, Schritt 1-5. Die für die Schutzwirkung maßgeblichen Arbeitsschritte 6 und 7 sind jedoch aufgrund der rauen Oberflächentextur nicht unmittelbar auf strukturierte Betonoberflächen übertragbar. Wendet man die Vorgaben der Regelwerke auf strukturierte, z.B. ausgewaschene Betonoberflächen an, lassen sich drei in der Schutzwirkung und im Erscheinungsbild grundsätzlich unterschiedliche Varianten ableiten, die im Zentrum dieser Arbeit stehen:

- Variante I, "Elastische Schlämme"

Applikation einer rißüberbrückenden elastischen Schlämme und ggf. einer farbigen, rißüberbrückenden Beschichtung OS-D II / OS 5.



Abb. 15: Waschbetoninstandsetzung Variante I, "elast. Schlämme"

- Variante II "Strukturerhalt"

Farbangleichung instandgesetzter Bereiche, einbinden loser Zuschläge und Reduzierung der Rauhtiefe durch Applikation von PCC-Mörteln/ -Spachteln bündig mit den Spitzen der Zuschlagkörner, erneutes Freilegen der Zuschläge durch Wasch- oder Strahlverfahren bei deutlich geringerer Rauhtiefe und Applikation einer farblosen, ggf. lasierend eingestellten Beschichtung OS-C/OS 4.

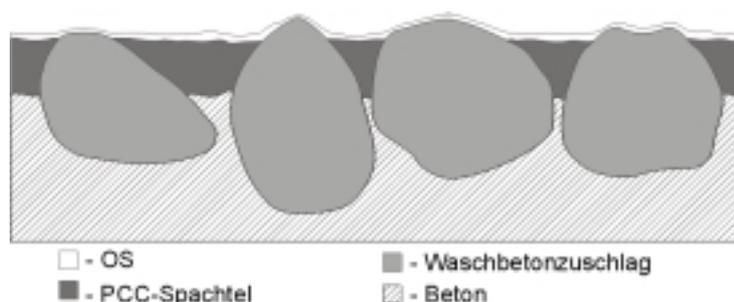


Abb. 16: Waschbetoninstandsetzung Variante II "Strukturerhalt"

- Variante III "Strukturverlust"

in Abhängigkeit von der Rauftiefe Applikation von PCC-Mörteln oder PCC-Spachteln bündig mit den Zuschlagspitzen, Egalisierung der Oberfläche durch PCC-Spachtel, Applikation einer farbigen, rißüberbrückenden Beschichtung OS-D II / OS 5.

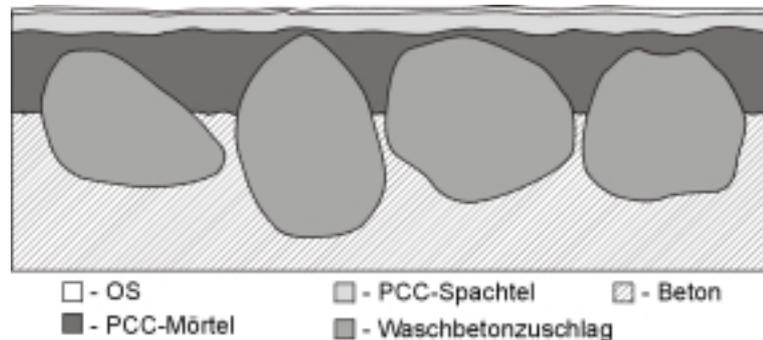


Abb. 17: Waschbetoninstandsetzung Variante III "Strukturverlust"

Mit Variante I wird die Waschbetonstruktur zumindest ansatzweise erhalten, es entsteht eine strukturierte, ggf. farbige Fläche mit deutlich reduzierter Rauftiefe. Variante III hat den vollständigen Verlust der ursprünglichen Oberflächenstruktur zur Folge. Es entsteht eine glatt gespachtelte Fläche, die als Beschichtungsuntergrund einer glatten Betonoberfläche entspricht. Weitestgehender Erhalt bzw. Wiederherstellung der ursprünglichen Struktur ist mit der Ausführung von Variante II möglich. Ob jedoch mit diesen Verfahren auch die erforderliche Schutzwirkung zu erzielen ist und ob die bisher üblichen Werkstoffe dafür einsetzbar sind, soll im Rahmen dieser Untersuchungen festgestellt werden.

2.5.3 ANFORDERUNGEN AN OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

Aufgrund identischer Schadensbilder und -mechanismen sind an Werkstoffe und Verfahren für Schutz und Instandsetzung strukturierter oder ausgewaschener Oberflächen grundsätzlich auch die Anforderungen der Regelwerke (vgl. Tab. 1, Tab. 2) zu stellen.

Auch wenn auf den als diffusionsdicht angenommenen Zuschlägen der Waschbetonoberfläche kein Schutz gegen Kohlendioxid diffusion erforderlich ist, muß jedoch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahme gewährleistet sein, daß auch auf Oberflächen mit erhöhter Rauheit ein geschlossener Beschichtungsfilm unter Einhaltung der systemspezifischen Mindestdicke sicher erzielt wird.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

Vorrangiges Ziel jeder Instandsetzungsmaßnahme ist die Beseitigung vorhandener Schäden und die Gewährleistung eines möglichst dauerhaften Schutzes vor weiteren Schäden. Aufgrund des vergleichsweise niedrigen Erkenntnisstandes und daher noch fehlender Regelwerke sind systematische Untersuchungen zu Schutz und Instandsetzung strukturierter Betonoberflächen erforderlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dies in drei aufeinanderfolgenden Untersuchungsschritten geschehen:

1. Orientierende Laboruntersuchungen (s. Kap. 3.2)
2. Anwendung und Umsetzung der Erkenntnisse aus dem 1. Schritt durch Anlegen von Probeflächen auf einem Bauwerk mit Waschbetonfassadenplatten (s. Kap. 3.3)
3. Vertiefende und weiterführende Laboruntersuchungen zur Absicherung der zuvor in den Schritten 1 und 2 gewonnenen Erkenntnisse (s. Kap. 3.4). Klärung noch offener Detailfragen, insbesondere auch zur statistischen Bewertung von Schichtdicken.

Die orientierenden Laboruntersuchungen des 1. Untersuchungsschrittes sollten Aussagen zu geeigneten Verfahrensweisen und Werkstoffen, den jeweiligen optische Erscheinungsbildern sowie erste Abschätzungen der Witterungsbeständigkeit ermöglichen.

Im 2. Untersuchungsschritt wurde die Möglichkeit zum Anlegen größerer Probeflächen von jeweils ca. 2 m² an einem geschädigten Bauwerk genutzt, um die Übertragbarkeit der im 1. Schritt ermittelten Laborergebnisse im Praxiseinsatz zu überprüfen. Durch die Beobachtung der Probeflächen über einen längeren Zeitraum sollten erste Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit der verwendeten Verfahren und Werkstoffe unter realen Bauwerks- und Witterungsbedingungen gesammelt werden. Neben der Feststellung technischer Parameter war auch die visuelle Beurteilung und Dokumentation des Erscheinungsbildes der instandgesetzten Probeflächen wichtiger Bestandteil dieses Untersuchungsschrittes.

Die beiden ersten Untersuchungsschritte hatten zusammenfassend das Ziel, die praktische Umsetzung der verschiedenen Instandsetzungsvarianten grundsätzlich festzustellen und dabei auch erste Erfahrungen bezüglich Dauerhaftigkeit und Schutzwirkung der verwendeten Werkstoffe und Verfahrensweisen zu sammeln. Daraus ließen sich dann auch erste grundsätzliche Empfehlungen für Instandsetzungsmaßnahmen an strukturierten Betonoberflächen ableiten.

Während in den Voruntersuchungen die grundsätzliche Eignung verschiedener Instandsetzungsvarianten festgestellt werden konnte, lag der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen auf der sicheren Gewährleistung einer dauerhaften Schutzwirkung für die Instandsetzung von Waschbetonbauteilen bei weitestgehendem Erhalt bzw. Wiederherstellung der ursprünglichen Waschbetonstruktur. Aufschluß darüber sollte die Untersuchung folgender Parameter liefern:

- Variation der Kornform der Waschbetonoberfläche
- Einfluß von Kornform und Rauhtiefe auf Verbund und Struktur der PCC-Mörtel und PCC-Spachtel,
- Eignung von PCC-Grobmörteln neben PCC-Feinspachteln hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Ausstrahlzeit und Verbund, insbesondere bei höheren Rauhtiefen,
- Verbundverhalten von Oberflächenschutzsystem und Untergrund,
- Einfluß des Untergrunds (Kornform und Rauhtiefe), der Eigenschaften, Auftragsmenge und Anzahl der Deckschichten sowie des Applikationsverfahrens der Beschichtung auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung.
- Anwendung und Auswahl statistischer Auswerteverfahren auf die Ergebnisse der Schichtdickenmessungen als ganz wesentlicher Teil des 3. Untersuchungsschrittes.

3.2 VORUNTERSUCHUNGEN IM LABOR

3.2.1 PROBEKÖRPER

Für die orientierenden Untersuchungen des 1. Schrittes sollten ausgewaschene Betonoberflächen zum Einsatz kommen, die einerseits der Waschbetonstruktur von Bauwerken möglichst vergleichbar waren, die andererseits aber als Probekörper in großer Zahl bei gleichbleibender Ausführungsqualität kostengünstig im Handel verfügbar waren.

Aus den vorgenannten Gründen wurden als Probekörper Waschbetongehwegplatten mit gebrochenem Oberflächenkorn, Serie "Nordisch-weiß" (siehe Abb. 18) und den Abmessungen 50 x 50 x 5 cm gewählt. Die Platten weisen im Mittel eine Rauhtiefe von 3 mm auf und besitzen eine ausreichend große Beschichtungsfläche, so daß Randeffekte bei der Beschichtung und der Beurteilung keinen Einfluß haben können. Die vergleichsweise geringe Rauhtiefe impliziert für die Auswahl der Instandsetzungswerkstoffe zunächst eine Beschränkung nur auf PCC-Spachtel, was aber wegen der vorgesehenen orientierenden Untersuchungen dieses 1. Untersuchungsschrittes hier keine grundsätzliche Einschränkung darstellt.

Im folgenden werden unbeschichtete Probekörper als Waschbetongrundkörper, die beschichteten Platten als Waschbetonverbundkörper bezeichnet.

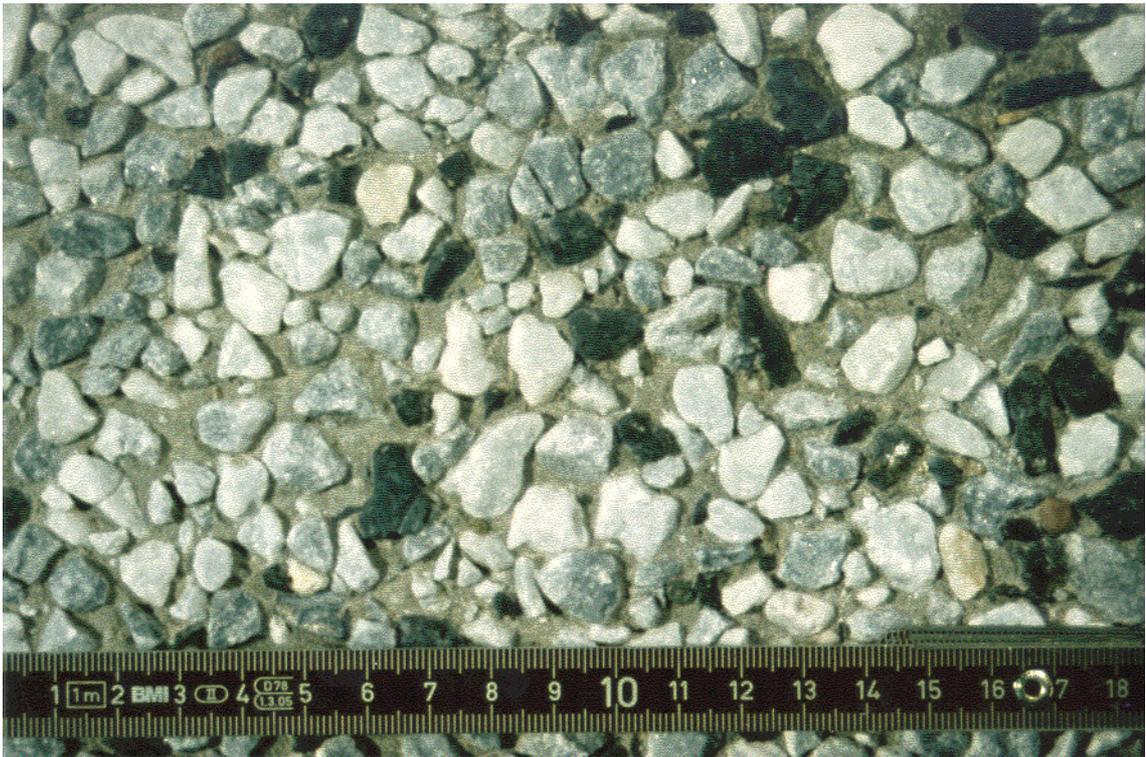


Abb. 18: Grundkörper Waschbetongehwegplatte "Nordisch-Weiß"

3.2.2 INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE

Für die Untersuchungen wurden von sieben marktführenden Herstellern ZTV-SIB geprüfte Werkstoffsysteme beschafft. Es sollten nur diese Werkstoffe zur Anwendung kommen, da u.a. durch die vorgeschriebenen Eignungsprüfungen und Fremdüberwachung ein definiertes Eigenschaftsprofil für Schutz und Instandsetzungsaufgaben gewährleistet ist. Für den 1. Untersuchungsschritt standen daher die in Tab. 3 aufgeführten, handelsüblichen Oberflächenschutzsysteme zur Verfügung:

Tab. 3: Oberflächenschutzsysteme des ersten Untersuchungsschrittes

System	PCC-Spachtel	Oberflächenschutz- beschichtung	eingesetzt für Variante
1	FS1	OS 5-1	III, "Strukturverlust"
2	FS2	OS 4-2	II, "Strukturerhalt"
3	FS3	OS 4-3	III, "Strukturverlust"
	FS3	OS 5-3	II, "Strukturerhalt"
4	FS4	OS 4-4	II, "Strukturerhalt"
5	FS5	OS 5-5	III, "Strukturverlust"
6	ES6	-	I, "elast. Schlämme"
7	ES7	-	I, "elast. Schlämme"

3.2.3 HERSTELLUNG DER VERBUNDKÖRPER

Vor dem Beschichten wurden die Grundkörper gründlich mittels Kaltwasserstrahlen gereinigt. Die so vorbereiteten Platten wurden zum Beschichten vertikal montiert, um eine praxisnahe Applikation zu gewährleisten. Alle PCC-Spachtel, elastischen Schlämme und Beschichtungen wurden sorgfältig nach Herstellerangaben angemischt und verarbeitet.

Als Applikationsmöglichkeit kommen sowohl für die Feinspachtel als auch für die Beschichtungen die manuelle und die Spritzapplikation in Frage. Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde aufgrund der geringen Größe der Grundkörper jedoch nur die manuelle Applikation der Materialien durchgeführt. Die Ausführung der Arbeiten erfolgte durch qualifiziertes Fachpersonal.

- Variante I, "elastische Schlämme"

Die Applikation der Schlämme erfolgte mittels Quast in einem Arbeitsgang.

- Variante II, "Strukturerhalt"

Wenn beim Anmischen der PCC-Spachtel die Einstellung der Konsistenz durch Wasserzugabe zulässig war, wurde die maximale Wassermenge zugegeben, um eine möglichst gute Verarbeitbarkeit auf Waschbeton zu gewährleisten. Die Applikation erfolgte mittels Metallreibr Brett in einem Arbeitsgang, wobei der Spachtel oberflächenbündig mit den Kieseln abgekratzt wurde. Nach dem Freilegen der Waschbetonstruktur (s. Kap. 3.2.4) wurde die Oberfläche mittels Druckluft gereinigt. Die Applikation der Beschichtung erfolgte dann ebenfalls in senkrechtem Zustand mittels Neoprenrolle.

- Variante III, "Strukturverlust"

Die Applikation erfolgte wie bei Variante II. Abweichend davon wurde im 1. Arbeitsgang der Spachtel oberflächenbündig mit den Kieselspitzen aufgetragen. Nach einer ggf. erforderlichen Wartezeit wurde noch "frisch in frisch" eine zweite Schicht aufgetragen, um eine Überdeckung der Kieselspitzen von ca. 1 mm zu gewährleisten. Nach der vorgeschriebenen Aushärtezeit erfolgte die Beschichtung mittels Neoprenrolle gemäß Herstellervorschrift, ebenfalls in senkrechtem Zustand.

Insgesamt wurden auf diese Weise mit den eingesetzten Werkstoffen (s. Kap. 3.2.2) auf den Waschbetongrundkörpern (s. Kap. 3.2.1) für die Instandsetzungsvarianten I - III die in der folgenden Tabelle aufgeführten Verbundkörper hergestellt.

Tab. 4: Anzahl für den 1. Untersuchungsschritt hergestellter Verbundkörper

System	Instandsetzungs- variante	PCC	PCC + Beschichtung	Schlämme	Summe
1	III, "Strukturverlust"	4	4		8
2	II, "Strukturerhalt"	4	4		8
3	III, "Strukturverlust"	4	4		8
	II, "Strukturerhalt"	4	4		8
4	II, "Strukturerhalt"	4	4		8
5	III, "Strukturverlust"	4	4		8
6	I, "elast. Schlämme"			2	2
7	I, "elast. Schlämme"			2	2
Gesamt					52

3.2.4 FREILEGEN DER WASCHBETONSTRUKTUR

Zur Ermittlung eines geeigneten Verfahrens zur Freilegung der Zuschläge nach der Applikation der PCC-Spachtel mußten zunächst Vorversuche mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden. Das Auswaschen mittels Bürste oder Schwamm erwies sich als ungeeignet, da der Erhärtungsfortschritt des Feinspachtels nur schwer beurteilbar und somit die auszuwaschende Materialmenge kaum zu steuern ist. Zusätzlich ließen sich auf den Kieseln zurückbleibende Zementschleier nicht vollständig entfernen und beeinflussen das Erscheinungsbild des Waschbetons nachteilig (vgl. auch Kap. 2.5.1).

Als sehr brauchbare Alternative erwies sich dagegen das bei der Betoninstandsetzung auf der Baustelle verfügbare, zum Entrosten der freigelegten Bewehrungsstäbe und Reinigen der Reparaturflächen eingesetzte, wasservernebelte Strahlverfahren mit festem Strahlgut.

Zur Freilegung der Waschbetonzuschläge wurde die Feinspachteloberfläche nach einer Erhärtungszeit von 1-2 Tagen mit festem Strahlgut, bei einem Druck von 4 bar und einem Düsenabstand von ca. 30 cm ausgestrahlt. Die Rauhtiefe der Oberfläche betrug nach dem Ausstrahlen ca. 1 mm.

Das Verfahren kann nach der Erhärtung des Feinspachtels eingesetzt werden und die abgetragene Materialmenge, d.h. die Rauhtiefe ist gut steuerbar. Der optische Eindruck der Waschbetonoberfläche entspricht trotz reduzierter Rauhtiefe nahezu dem Originalzustand. Alle Verbundkörper der Variante II "Strukturerhalt" wurden daher im Labor in einer geschlossenen Strahlkabine mit Schmelzkammerschlacke der Körnung 0,25 - 2 mm ausgestrahlt. Dieses Strahlverfahren wurde verwandt, da im Labor silikosefreie Strahlverfahren vorgeschrieben sind.

3.2.5 UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

3.2.5.1 Materialkennwerte

An den PCC-Spachteln wurden zur Sicherstellung der Identität am Frischmörtel Konsistenz, Rohdichte und Luftporengehalt nach TP BE-PCC, Abschn. 4.3 ermittelt. Am Festmörtel wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen gemäß TP BE-PCC, Abschn. 5.4 ermittelt. Diese Kennwerte sind gleichzeitig dazu geeignet, mögliche Zusammenhänge zwischen Konsistenz und Verarbeitbarkeit auf Waschbetonoberflächen sowie zwischen Festigkeit und dem Zeitaufwand zur Freilegung der Waschbetonstruktur (s. Variante II) zu erkennen.

Tab. 5: Materialkennwerte der PCC-Spachtel des 1. Untersuchungsschrittes

System	Ausbreitmaß		Rohdichte		LP-Gehalt		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
	[cm]		[kg/dm ³]		[%]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Bezugs- wert	Mess- wert	Bezugs- wert	Mess- wert	Bezugs- wert	Mess- wert	Bezugs- wert	Mess- wert	Bezugs- wert	Mess- wert
1	16,6	14,0	1,960	1,916	12,8	12,0	12,1	10,7	42,9	38,1
2	15,6	15,9	1,985	1,887	7,0	9,8	9,8	11,4	34,2	41,2
3	17,6	16,9	2,048	1,950	5,9	11,5	7,4	10,6	40,0	39,7
4	17,4	17,9	1,956	1,911	6,0	8,9	12,2	12,5	40,1	35,2
5	16,9	17,1	1,871	1,943	7,4	6,9	12,5	12,2	40,3	46,7

Abweichungen von den Angaben der zugehörigen technischen Merkblätter bewegen sich in einem Rahmen, der an der Identität der Werkstoffe keinen Zweifel erfordert und überwiegend den Toleranzen der langjährigen Fremdüberwachung entspricht.

3.2.5.2 Applikation und Auftragsmengen

a) elastische Schlämmen (Variante I)

Die Applikation der Schlämmen mittels Quast ist unproblematisch. Durch die erhöhte Rauhtiefe der Platten ist die Auftragsmenge jedoch zwangsläufig wesentlich höher als auf glatten Betonoberflächen.

b) PCC-Spachtel (Variante II und III)

Bei der Applikation der verschiedenen PCC-Spachtel ist festzustellen, daß unabhängig von der Konsistenz ein im Vergleich zu glatten Betonoberflächen höherer Kraftaufwand erforderlich ist, um den Spachtel in die Kieselzwischenräume zu applizieren.

So weist zum Beispiel der PCC-Spachtel FS 4 das höchste Ausbreitmaß, d. h. die weichste Konsistenz auf, war jedoch aufgrund der extrem hohen Klebkraft des Spachtels am schwersten aufzutragen. Grundsätzlich ist jedoch im Rahmen der Vorgaben der technischen Merkblätter eine möglichst weiche Konsistenz anzustreben, um ein optimales Ausfüllen von Spalten und Zwickeln zwischen den Waschbetonzuschlägen mit Spachtel zu ermöglichen.

c) Oberflächenschutzbeschichtung (Variante II und III)

Bei der Applikation der Beschichtungen mittels Neoprenrolle erwiesen sich die flächig gespachtelten, glatten Platten der Variante III "Strukturverlust" als problemlos. Auf den ausgestrahlten Verbundkörpern der Variante "Strukturerhalt" war gegenüber glatten Oberflächen ein erhöhter Kraftaufwand erforderlich, um die Beschichtung möglichst gleichmäßig auch zwischen den Kieseln aufzutragen.

Zusätzlich wurden die Auftragsmengen der Verbundkörper der Instandsetzungsvariante III „Strukturverlust“ ermittelt, um das zusätzliche Gewicht bei Überlegungen zur Standsicherheit abschätzen zu können. Zur Ermittlung wurden Werkzeuge und Gebinde vor und nach der Applikation gewogen. Bei einer Rauhtiefe der Grundkörper von ca. 3 mm lagen die Auftragsmengen für die kompletten Systeme zwischen 5 und 6 kg/m².

3.2.5.3 Freilegen der Waschbetonstruktur

Die Ausstrahlzeiten der verschiedenen PCC-Spachtel für eine Rauhtiefe von 1 mm variierten sehr stark. Bei den PCC-Spachteln FS3 und FS4 lag die Bearbeitungszeit zum Freilegen der Kieselspitzen zwischen 12 und 20 min/m², bei FS2 wurden > 60 min/m² benötigt. Die Mittelwerte der Messungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 6: Ausstrahlzeiten der Verbundkörper "Strukturerhalt", MW aus je 8 EW

System	PCC-Spachtel	Ausstrahlzeit	Druckfestigkeit β_{D28}
		[(min/m ²)/mm Schichtdicke]	[N/mm ²]
2	FS2	68	41,2
3	FS3	12	39,7
4	FS4	20	46,7

Es ist davon auszugehen, daß die Ursache für die sehr hohe Ausstrahlzeit des PCC-Spachtels FS 2 ein hoher Kunststoffanteil ist, dessen "gummiartige" Elastizität die Strahlkörner abprallen läßt, ohne daß ein Materialabtrag erfolgt.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Strahldauer zur Freilegung der Kieselspitzen und der Druckfestigkeit der Materialien ließ sich nicht feststellen.

3.2.5.4 Visuelle Kontrolle

Sowohl während der Erhärtung als auch nach der Bewitterung (s. Kap. 3.2.5.5) wurden die Platten visuell auf eventuelle Risse, Blasen, Ablösungen etc. untersucht.

Bei den elastischen Schlämmen wurde schon nach einem Tag eine ausgeprägte Rißbildung beobachtet. Ursache hierfür ist, daß die Auftragsdicke der Schlämmen aufgrund einer Rauftiefe von i.M. 3 mm vielerorts zwangsläufig die erlaubte Schichtdicke von max. 2 mm deutlich überschritt, so daß Schwindrisse die Folge waren. Durch die Applikation einer zweiten Schicht wurde die Rißbildung zwar deutlich reduziert, war aber dennoch stark ausgeprägt (vgl. Abb. 19). Es wurde daher auf weitere Untersuchungen an diesen Probekörpern verzichtet.



Abb. 19: Rißbildung an einer elastischen Schlämme

Die PCC- Spachtel blieben sowohl bei den ausgestrahlten Platten der Variante II als auch den flächig gespachtelten, glatten Platten der Variante III schadensfrei. Durch das Strahlen wurden naturgemäß einzelne Poren und nicht völlig verfüllte Zwickel zwischen den Waschbetonzuschlägen freigelegt, so daß ggf. vorhandene Fehlstellen deutlich erkannt werden könnten.

Die Oberflächenschutzsysteme wiesen auf den glatten Platten keinerlei Fehlstellen, Blasen oder Ablösungen auf. Auf den ausgestrahlten Platten waren bei einem System vereinzelt kleine Poren Durchmesser ≤ 1 mm am Übergang Kiesel/Spachtel zu erkennen.

3.2.5.5 Verbundverhalten

Da auch das Verbundverhalten den Erfolg einer Instandsetzungsmaßnahme entscheidend beeinflusst, wurde sowohl der Verbund zwischen Waschbetonuntergrund und PCC-Spachtel als auch zwischen PCC-Spachtel und Beschichtung untersucht. Dies erfolgt durch die Ermittlung der Haftzugfestigkeit gemäß TP BE-PCC, bzw. TP-OS /BMV1/. Hierfür werden nach dem Vorbohren mit einem Kernbohrer, Innendurchmesser $d_i = 50$ mm, mind. 20 mm tief, Prüfstempel mit einem lösemittelfreien EP-Kleber auf die vorgebohrten Flächen geklebt und mit einem geeichten Haftzugerät (Typ Freundl F 20 D "Easy", 20 kN) mit einer Lastanstiegsgeschwindigkeit von 100 N/s abgerissen.

Zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit lagerten die Verbundkörperserien bis zur Prüfung nach 28 Tagen im Normalklima N (24 h feucht, danach Normalklima DIN 50 014 - 23/50 ± 2 , entspricht Lagerung B nach TP-BE PCC). Bei der Hälfte der Verbundkörperserien erfolgte die Prüfung nach 28 Tagen, die andere Hälfte wurde nach der Lagerung im Normalklima N unmittelbar anschließend einer Beanspruchung von Temperaturwechseln und darauffolgend Frost-Tausalzwechseln ausgesetzt, die im folgenden auch Lagerung FT genannt wird.

Klimabedingungen und Dauer der Beanspruchung setzten sich wie folgt zusammen:

Temperaturwechselbeanspruchung (10 Zyklen):

- Warmlagerung, Temperatur 60 ± 5 °C; Dauer 5 h 45 min
- Beregnung mit Leitungswasser, Temperatur 12 ± 3 °C, Dauer 15 min

Frost-Tausalzbeanspruchung (20 Zyklen):

- Lagerung in gesättigter Kochsalzlösung, Temperatur -15 ± 2 °C; Dauer 2 h
- Lagerung im Wasserbad, Temperatur 20 ± 2 °C; Dauer 2 h

Die Beanspruchung der Lagerung FT erfolgte in Anlehnung an die Verbundkörperprüfungen nach TP-BE PCC, jedoch mit reduzierter Zyklenanzahl.

Die Regelwerke /BMV1/, /DAfStb1/ schreiben Mindesthaftzugfestigkeiten von $\geq 1,5$ N/mm² zwischen Betonunterlage (B) und Betonersatz (BE) und $\geq 0,8$ N/mm² zwischen Oberflächenschutzbeschichtung (OS) und Betonersatz sowie die Beurteilung des Bruchbildes vor.

Unterschieden wird zwischen Kohäsionsbrüchen im Material, zum Beispiel in der Betonunterlage oder im Betonersatz und Adhäsionsbrüchen (A) zwischen den Schichten z.B. zwischen Betonersatz und Betonunterlage oder zwischen Betonersatz und Beschichtung. Adhäsionsbrüche, die zu mehr als 25 % in der Klebefuge zwischen Instandsetzungssystem und Prüfstempel erfolgen, sind zu verwerfen. Grundsätzlich sind Kohäsionsbrüche in der Betonunterlage oder im Betonersatz am vorteilhaftesten, da dann der Verbund zwischen den Schichten größer ist als die Zugfestigkeit der Materialien /Bud1/, /Schu1/, /Sem1/.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 20 und Abb. 21) sind die ermittelten Ergebnisse grafisch, die Zahlenwerte sind im Anhang in den Tab. 25 und Tab. 26 auf Seite 114, dargestellt.

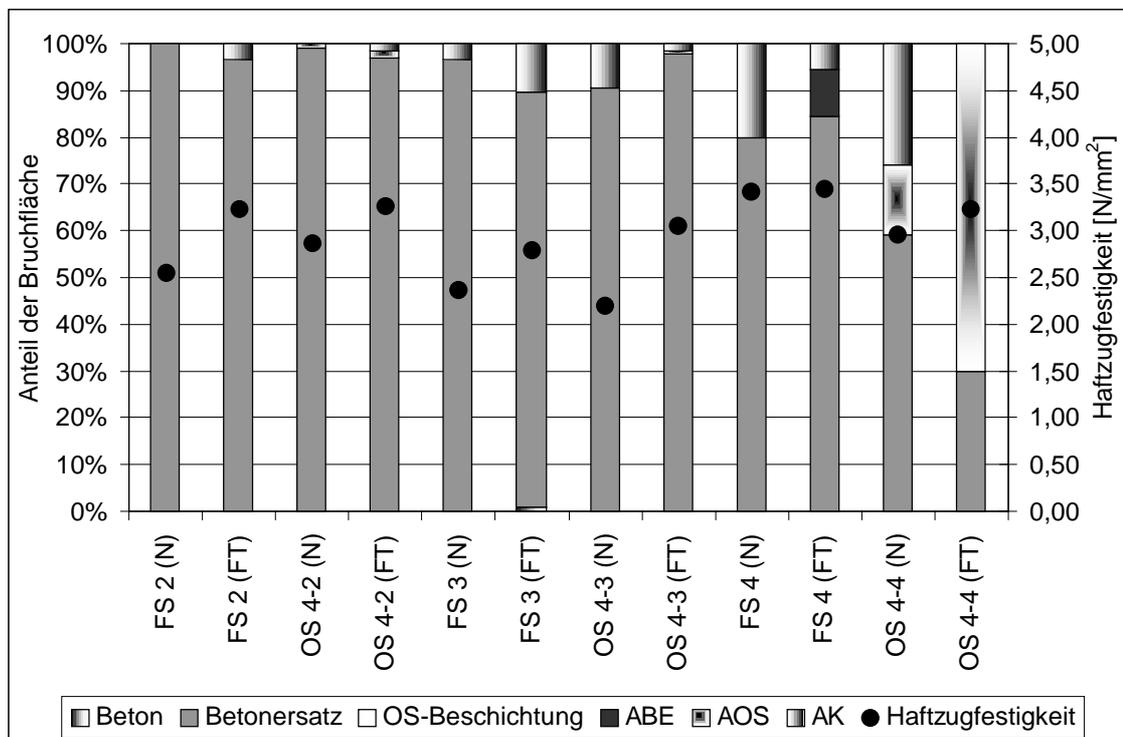


Abb. 20: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der Variante II "Strukturerhalt"

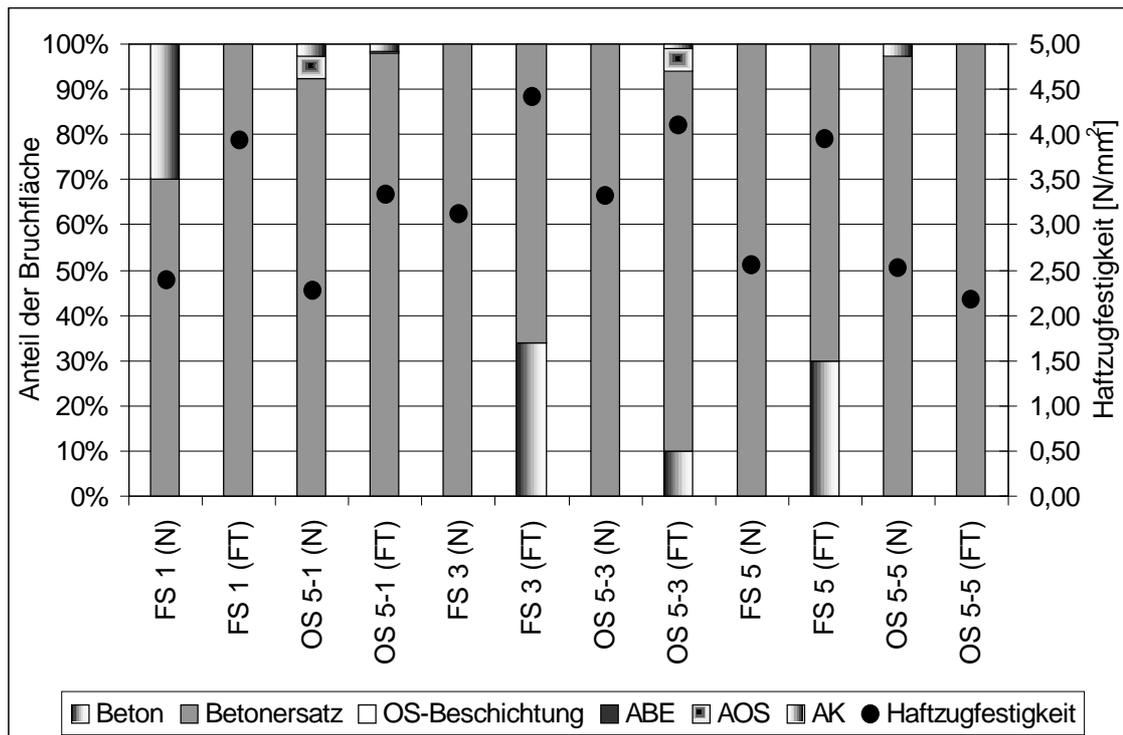


Abb. 21: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der Variante III "Strukturverlust"

Festzustellen ist, daß bei der Haftzugfestigkeit die Anforderungen der Regelwerke eingehalten werden. Aus den Abbildungen wird auch deutlich, daß die Temperaturwechsel- und Frost-Tausalzbeanspruchung der Lagerung FT die Haftzugfestigkeit nicht negativ beeinflussen, die Werte sind ungefähr gleich oder höher als bei Lagerung N.

Grundsätzlich kann von einem guten Verbund sowohl zwischen der Waschbetonoberfläche und dem PCC-Spachtel als auch zwischen PCC-Spachtel und Beschichtung ausgegangen werden.

3.2.6 ZUSAMMENFASSUNG DER VORUNTERSUCHUNGEN IM LABOR

In den orientierenden Laboruntersuchungen des 1. Untersuchungsschrittes wurden Erkenntnisse zu geeigneten Verfahrensweisen und Werkstoffen, den jeweiligen optischen Erscheinungsbildern und erste Abschätzungen der Witterungsbeständigkeit gewonnen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Applikation der elastischen Schlämmen, der PCC-Spachtel und auch der Oberflächenschutzbeschichtungen gemäß den Vorgaben der technischen Merkblätter war unproblematisch. Insgesamt war jedoch ein erhöhter Kraftaufwand gegenüber glatten Betonoberflächen und naturgemäß bei den elast. Schlämmen ein erhöhter Materialverbrauch/m² festzustellen, was aber kein grundsätzliches Einsatzhindernis darstellt.

- b) Bei der visuellen Kontrolle wurde bei den elastischen Schlämmen eine ausgeprägte Rißbildung beobachtet, da die vorgeschriebene Schichtdicke aufgrund der Rauhtiefe der Waschbetongrundkörper zwangsläufig nicht eingehalten werden konnte. Die erhärteten PCC-Spachtel und die Oberflächenschutzbeschichtungen zeigten sich, abgesehen von einem PCC-Spachtel mit vereinzelt Poren, fehler- und rißfrei.
- c) Zum Freilegen der Waschbetonstruktur erwies sich das Strahlverfahren mit festem Strahlgut als vorteilhaft, da es einfach durchführbar und die Rauhtiefe gut zu steuern ist. Die ermittelten Ausstrahlzeiten der verschiedenen PCC-Spachtel variierten stark, waren aber auch in wirtschaftlich vertretbarem Rahmen durchführbar. Ein Zusammenhang zwischen Strahldauer und Festigkeit konnte nicht festgestellt werden.
- d) Die Messungen der Haftzugfestigkeit zeigten einen guten Verbund zwischen Waschbeton und Oberflächenschutzsystem, die Anforderungen der Regelwerke wurden von allen Proben eingehalten. Eine negative Beeinflussung der Ergebnisse durch die Temperatur und Frost-/ Tauwechselbeanspruchung lag nicht vor.

Im Hinblick auf die folgenden Untersuchungsschritte lassen sich für die drei vorgesehenen Instandsetzungsvarianten folgende Schlüsse ziehen:

- Variante I, "Elastische Schlämme"

Da bereits bei der vergleichsweise geringen Rauhtiefe der Waschbetongrundkörper von 3 mm eine ausgeprägte Rißbildung bei der Erhärtung der Schlämmen festzustellen war, wird diese Variante nicht weiter verfolgt, da die Rauhtiefen von Waschbetonoberflächen in der Praxis meist deutlich höher sind.

- Variante II "Strukturerhalt"

Die Ausführung auf Waschbeton mit vergleichsweise geringer Rauhtiefe unter Verwendung von PCC-Spachtel und OS 4 / OS-C Beschichtungen ist unproblematisch und ermöglicht weitestgehenden Erhalt bzw. Wiederherstellung der ursprünglichen Oberflächenstruktur mit offenbar guter Aussicht auf dauerhaften Erfolg.

- Variante III "Strukturverlust"

Hier entspricht die völlige Egalisierung der Oberfläche mit PCC-Spachtel und Applikation einer farbigen OS 5 / OS-D II Beschichtung auf der vorliegenden geringen Rauhtiefe nahezu der Verfahrensweise der klassischen Betoninstandsetzung und somit dem Stand der Technik. Aufgrund des guten Verbunds mit dem Untergrund kann insgesamt von einem dauerhaften Instandsetzungserfolg ausgegangen werden.

Die orientierenden Laboruntersuchungen zur Instandsetzung von Waschbetonoberflächen haben ergeben, daß die Varianten II "Strukturerhalt" und III "Strukturverlust" unter Verwendung ZTV-SIB geprüfter Oberflächenschutzsysteme offensichtlich lohnenswerte Verfahrensansätze sind, deren relativ aufwendige praktische Umsetzung nun auf realen Bauwerksoberflächen mit deutlich höherer Rauhtiefe sinnvoll und für die Gewinnung weiterer Erkenntnisse auch erforderlich ist.

Ziele des 2. Untersuchungsschrittes an realen Bauwerksoberflächen werden dementsprechend sein:

- Zusätzlicher Einsatz von PCC-Mörteln neben PCC-Spachteln
- Untersuchung auf realen Waschbetonoberflächen höherer Rauhtiefe
- Erweiterung der Mörtel-/Spachtelapplikation um Spritzverfahren
- Applikation unter Baustellenbedingungen von Firmenpersonal
- Verhalten der applizierten Systeme bei freier Bewitterung

Die Zahl der eingesetzten Werkstoffsysteme mußte bei diesem Untersuchungsschritt auf vier markteingeführte Hersteller herabgesetzt werden, da der Probeflächenumfang begrenzt war und auf jeden Fall jeweils repräsentative Flächen von ca. 2 m² angelegt werden sollten.

3.3 UNTERSUCHUNGEN AM BAUWERK

Wie bereits einleitend dargestellt sind weder in der Literatur noch seitens der Hersteller wissenschaftliche abgesicherte Erfahrungen an instandgesetzten Waschbeton- oder strukturierten Betonfassaden vorhanden (s. Kap. 2.5).

Im 2. Untersuchungsschritt mußten daher durch Anlegen größerer Probeflächen von ca. 1,75 - 2,25 m² am Bauwerk die Übertragbarkeit der im 1. Schritt ermittelten Laborergebnisse im Praxiseinsatz überprüft werden. Neben der Feststellung der Eignung der verwendeten Werkstoffe und Instandsetzungsvarianten ist auch die visuelle Beurteilung des Erscheinungsbildes der instandgesetzten Probeflächen wichtiger Bestandteil dieses Untersuchungsschrittes.

Die Beobachtung und Untersuchung der Probeflächen konnte aufgrund von Terminvorgaben des Gebäudeeigentümers nur über ein Jahr erfolgen. Trotz dieser zeitlichen Einschränkung ermöglichte diese Zeitspanne jedoch die Überprüfung der Ergebnisse der Voruntersuchungen bezüglich der verwendeten Verfahren und Werkstoffe sowie erste Abschätzungen der Witterungsbeständigkeit der verwendeten Systeme. Der zeitliche Ablauf der Bauwerksuntersuchungen nach Fertigstellung der Beschichtung gliederte sich in folgende drei Teilschritte:

- Bemusterung 1 Optische Erfassung und Ermittlung des Neuzustands nach 28 Tagen, Ermittlung der Haftzugfestigkeit, Entnahme von Bohrkernen \varnothing 50 mm für Karbonatisierungstiefe, Schichtdickenmessungen und Strukturuntersuchungen
- Bemusterung 2 Optische Zustandserfassung nach 6 Monaten
- Bemusterung 3 Wie Bemusterung 1, zur Ermittlung möglicher Materialveränderungen nach ca. 12 Monaten Bewitterung

3.3.1 ANGABEN ZUM BAUWERK

Das zum Anlegen von Probeflächen zur Verfügung stehende Bauwerk wurde im Jahre 1969 als Stahlbeton-Skelettbau mit einer Vorhangfassade aus Waschbeton-Fertigteilen erstellt. Die Oberfläche besteht aus gebrochenen Diabas-Körnern, ϕ max. 32 mm, die Rauhtiefe beträgt je nach Fassadenseite ca. 5-7 mm.

Die folgende Abbildung zeigt die Südansicht des Gebäudes.



Abb. 22: Bauwerk mit Waschbetonoberfläche (Probeflächen im 1. OG bereits angelegt)

Nach ca. 20jähriger Standzeit des Bauwerks traten erste Abplatzschäden an den Oberflächen der Waschbetonplatten auf. Die dann veranlaßten, umfangreichen Untersuchungen der Schäden durch Messung der Bewehrungsüberdeckung und der Karbonatisierungstiefe ergaben ein so hohes Korrosionspotential, daß zur Vermeidung weiterer Schäden die Applikation eines Oberflächenschutzsystemes unausweichlich erschien. Wegen des schon einleitend erläuterten geringen Kenntnisstandes für derartige Arbeiten auf strukturierten oder ausgewaschenen Betonoberflächen stellte der Eigentümer repräsentative Flächen des Bauwerks für Probeflächen zur Verfügung, da er sich daraus auch Entscheidungshilfen für sein weiteres Vorgehen erhoffte.

3.3.2 INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit geeigneter Probeflächen mußte die Anzahl der Werkstoffsysteme reduziert werden. Aus den Vorversuchen wurden vier Systeme stellvertretend ausgewählt, die über die erforderlichen ZTV-SIB geprüften Eigenschaften verfügen und deren PCC-Mörtel/ -Spachtel die Bandbreite der Werkstoffeigenschaften der am Markt verfügbaren Materialien weitgehend abdecken.

Im Gegensatz zur Verfahrensweise bei Untersuchungsschritt 1 wurde zusätzlich ein Haftbrücke zur Verbundsteigerung appliziert. Weiterhin wurden aufgrund der höheren Rauhtiefe der Oberfläche PCC-Mörtel und PCC-Spachtel zur Egalisierung der Waschbetonoberfläche verwendet. Gemäß den Angaben in den technischen Merkblättern ist zur Gewährleistung einer rißfreien Erhärtung bei den PCC-Spachteln nur eine Schichtdicke von ≤ 3 mm in einem Arbeitsgang zulässig. Es wird daher auch die Eignung der größeren PCC-Mörtel zur Egalisierung des Untergrundes untersucht, da je nach Produkt auch Schichtdicken ≥ 5 mm in einem Arbeitsgang zulässig sind.

Die ZTV-SIB geprüften Werkstoffsysteme für die Probeflächen "Strukturerhalt" und "Strukturverlust" bestanden grundsätzlich aus folgenden Werkstoffen (Kennwertbereiche in Klammern):

- Haftbrücke
- PCC-Mörtel (Druckfestigkeit β_{D28} 40,0 - 61,4 N/mm², Größtkorn ≤ 2 mm)
- PCC-Spachtel (Druckfestigkeit β_{D28} 34,2 - 41,1 N/mm², Größtkorn $\leq 0,6$ mm)
- Beschichtung OS 4 / OS-C "Strukturerhalt", bzw. OS 5 / OS-D II "Strukturverlust"

3.3.3 ANLEGEN DER PROBEFLÄCHEN

Für jedes System standen an der Südseite des Gebäudes drei Probeflächen mit einer Größe von 1,75 - 2,25 m² im Brüstungsbereich des 1. Obergeschosses zur Verfügung. So war zusätzlich sichergestellt, daß die Probeflächen nicht von Unbefugten erreicht werden konnten.

Basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden je System jeweils eine Probefläche mit der Instandsetzungsvariante II "Strukturerhalt" und III "Strukturverlust" angelegt. Für eine dritte Probefläche mit der Maßgabe "Strukturerhalt" unter Verwendung von PCC-Spachteln wurde Art und Applikation der Oberflächenschutzbeschichtung freigestellt, um ggf. auch vorhandene, eigene Instandsetzungskonzepte der jeweiligen Systemhersteller kennenzulernen bzw. deren Zweckmäßigkeit beurteilen zu können. Das Anlegen der Probeflächen erfolgte jeweils von Fachkräften, die von den Systemherstellern zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 7: Instandsetzungsvarianten und Werkstoffe der Probeflächen am Bauwerk

System	Probefläche	PCC-Mörtel	PCC-Spachtel	OS-Beschichtung	Variante
1	A 1	GM1		OS 4-1	II, "Strukturerhalt"
	A 2	GM1	FS1	OS 5-1	III, "Strukturverlust"
	A 3		FS1	OS 5-1	II, "Strukturerhalt"
2	B 1	GM2		OS 4-2	II, "Strukturerhalt"
	B 2	GM2	FS2	OS 5-2	III, "Strukturverlust"
	B 3		FS2	OS 4-2	II, "Strukturerhalt"
3	C 1	GM3		OS 4-3	II, "Strukturerhalt"
	C 2	GM3	FS3	OS 5-3	III, "Strukturverlust"
	C 3		FS3	OS 4-3	II, "Strukturerhalt"
4	D 1		FS4	OS 4-4	II, "Strukturerhalt"
	D 2	GM4	FS4	OS 5-4	III, "Strukturverlust"

Die Untergrundvorbereitung erfolgte gemäß den Vorgaben der Regelwerke /BMV1/, /DAfStb1/. An den stark strukturierten Waschbetonoberflächen war kein weiteres Aufrauen (z.B. durch Nebelsandstrahlen) der Flächen zur Verbundsteigerung erforderlich. Aufgrund des bereichsweise starken Bewuchses mit Mikroorganismen (vgl. Abb. 6) wurde zur Vorbereitung des Untergrundes Heißwasserstrahlen anstatt des baustellenüblichen Kaltwasserstrahlen angewandt.

Das Mischungsverhältnis, die zeitliche Abfolge und das Applikationsverfahren der Instandsetzungssysteme erfolgte gemäß den Vorgaben der technischen Merkblätter. Abgesehen von einer Probefläche wurden alle Probeflächen manuell erstellt. Die Applikation der Haftbrücke erfolgte mittels Quast, die der PCC-Mörtel/-Spachtel mittels Metallreibbrett. An der Probefläche D1 wurde der PCC-Spachtel trotz der für die Anwendung des Verfahrens vergleichsweise geringen Größe der Fläche im Spritzverfahren appliziert. Sofern bei den Materialien die Einstellung der Konsistenz durch Wasserzugabe zulässig war, wurde auch bei diesem Untersuchungsschritt die höchste zulässige Wassermenge verwendet, um eine optimale Verarbeitbarkeit auf den rauen Waschbetonoberflächen, d.h. Ausfüllen aller Zwickel zwischen den Waschbetonzuschlägen, zu gewährleisten.

Auch bei der abschließenden Oberflächenschutzbeschichtung wurde die Applikation gemäß den Vorgaben der technischen Merkblätter durchgeführt. Die Applikation erfolgte aufgrund der geringen Größe der Probeflächen manuell mittels kurzfloriger Neoprenrollen, wie in Untersuchungsschritt 1. Die PCC-Mörtel / -Spachtel waren zum Zeitpunkt der Applikation der Oberflächenschutzbeschichtung zwischen 8 und 10 Tagen alt.

3.3.4 UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

3.3.4.1 Materialkennwerte

An den PCC-Mörteln und -Spachteln wurden am Frischmörtel Konsistenz, Rohdichte und Luftporengehalt nach TP BE-PCC, Abschn. 4.3 ermittelt. Am Festmörtel wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen gemäß TP BE-PCC, Abschn. 5.4 ermittelt. Diese Werte waren wie in Kap. 3.2 dazu gedacht, ggf. mögliche Bezüge zwischen Materialkennwerten und beobachtetem Verhalten zu ermitteln, aber auch um gravierende Abweichungen von den Vorgaben der technischen Merkblätter zu erkennen.

Die ermittelten Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen, Tab. 8 und Tab. 9, dargestellt.

Tab. 8: Materialkennwerte der PCC-Mörtel (GM) des 2. Untersuchungsschrittes

System	Ausbreitmaß		Rohdichte		LP-Gehalt		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
	[cm]		[kg/dm ³]		[%]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert
1	14,1	15,1	2,201	2,242	6,4	7,5	12,1	11,6	61,4	51,9
2	10,5	11,8	2,085	2,052	5,5	9,5	10,4	10,0	40,0	39,1
3	15,0	14,4	2,120	2,132	7,8	5,6	10,0	10,1	55,4	53,3
4	12,5	12,6	2,031	1,983	7,9	8,7	11,0	10,1	53,0	42,3

Tab. 9: Materialkennwerte der PCC-Spachtel (FS) des 2. Untersuchungsschrittes

System	Ausbreitmaß		Rohdichte		LP-Gehalt		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
	[cm]		[kg/dm ³]		[%]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert
1	16,6	14,7	1,960	1,984	12,8	11,6	12,1	10,0	42,9	41,2
2	15,6	15,6	1,985	1,928	7,0	9,0	9,8	10,2	34,2	30,2
3	17,6	19,1	2,048	2,097	5,9	5,8	7,4	9,6	40,0	42,6
4	17,4	19,8	1,956	1,964	6,0	7,0	12,2	13,9	40,1	41,6

Abweichungen von den Bezugswerten der zugehörigen technischen Merkblätter bewegen sich in einem Rahmen, der an der Identität der Werkstoffe keinen Zweifel erfordert und überwiegend den Toleranzen der langjährigen Fremdüberwachung entspricht.

3.3.4.2 Applikation und Auftragsmengen

Abgesehen von einer Probefläche erfolgte die Applikation der PCC-Mörtel/-Spachtel manuell mittels Metallreibbrett. Es zeigte sich, daß die manuelle Applikation der PCC-Mörtel aufgrund ihrer relativ steifen Konsistenz deutlich kraft- und zeitaufwendiger war als die der weicheren PCC-Spachtel. Grundsätzlich stellte die Applikation jedoch kein technisches Problem dar.

Bei der Probefläche D 1 wurde der PCC-Mörtel im Spritzverfahren appliziert. Die Steuerung der für dieses Verfahren vergleichsweise geringen Schichtdicke von nur ca. 6 mm war nicht präzise möglich, so daß die Waschbetonstruktur vollkommen "überdeckt" wurde. Um einen vertretbaren Strahlaufwand zur Freilegung der Waschbetonstruktur zu gewährleisten, war daher ein zusätzlicher Arbeitsgang, bei dem überschüssiges Material mit der Bürste entfernt wurde, erforderlich.

Auch am Bauwerk wurden die Auftragsmengen der Variante III "Strukturverlust" durch Wägung der Werkzeuge und Gebinde vor und nach der Applikation ermittelt. Bei einer Rauhtiefe der Bauwerksoberfläche von 5-7 mm lagen die Auftragsmengen für die kompletten Systeme zwischen 10 und 18 kg/m². Die Einzelwerte der Probeflächen sind in Tab. 27 im Anhang, Seite 115, aufgeführt. Die Angaben ermöglichen eine grundsätzliche Abschätzung der Verbrauchsmengen für derartige Instandsetzungsmaßnahmen und geben Aufschluß darüber, ob die Gewichtserhöhung ggf. statisch ein Problem darstellen kann. Die Prüfung im Einzelfalle anhand von Testflächen am Bauwerk ist jedoch grundsätzlich zu empfehlen.

3.3.4.3 Freilegen der Waschbetonstruktur

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde die Eignung von Strahlverfahren mit festem Strahlgut zur Entfernung von überschüssigem PCC-Spachtel und damit zur Freilegung der Waschbetonstruktur festgestellt. Es zeigte sich dort, daß der Zeitpunkt des Ausstrahlens bei PCC-Spachteln nach einer Aushärtezeit von 24 h, ohne Einfluß auf die Dauer dieses Arbeitsschrittes, frei wählbar ist.

Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Probeflächen am Bauwerk zu gewährleisten, sollten Zeitpunkt und Verfahrensweise des Ausstrahlens identisch sein. Dies konnte unter den gegebenen Baustellenbedingungen aus organisatorischen Gründen erst 7 Tage nach Herstellung der Probeflächen erfolgen. Die Rauhtiefe der Oberflächen betrug nach dem Ausstrahlen ca. 2 mm.

Die Ausstrahlzeiten pro m^2 und mm Schichtdicke und die jeweiligen 28-Tage Druckfestigkeiten sind in den folgenden Tabellen zusammengefaßt.

Tab. 10: Ausstrahlzeiten der PCC-Mörtel am Bauwerk

System	Probefläche	PCC-Mörtel	Ausstrahlzeit	Druckfestigkeit
			[(min/m ²)/mm Schichtdicke]	[N/mm ²]
1	A 1	GM1	17	51,9
2	B 1	GM2	15	39,1
3	C 1	GM3	15	53,3

Tab. 11: Ausstrahlzeiten der PCC-Spachtel am Bauwerk

System	Probefläche	PCC-Spachtel	Ausstrahlzeit	Druckfestigkeit
			[(min/m ²)/mm Schichtdicke]	[N/mm ²]
1	A 3	FS1	12	41,2
2	B 3	FS2	13	30,2
3	C 3	FS3	9	42,6
4	D 1	FS4	14	41,6

Grundsätzlich sind die Ausstrahlzeiten der PCC-Spachtel niedriger als die der PCC-Mörtel. Es ist jedoch zu erwarten, daß der Zeitaufwand zum Ausstrahlen am Bauwerk bei größeren Flächen und entsprechender Einarbeitung noch sinkt. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ausstrahlzeit und der Festigkeit ist auch hier bei den Bauwerksuntersuchungen nicht zu erkennen.

Es zeigte sich, daß die Kontrolle des Ausstrahlgrades durch den Düsenführer während des Strahlvorgangs nach entsprechender Übung und Einarbeitung prinzipiell kein Problem darstellte. Vor jeder Instandsetzungsmaßnahme ist daher das Anlegen entsprechender Probeflächen unverzichtbar, wobei dann ggf. auch der günstigste Zeitpunkt für diesen Arbeitsschritt herausgefunden werden kann.

3.3.4.4 Visuelle Begutachtung

Im Rahmen der Bemusterungen wurden die Probeflächen während der Applikationen, sowie nach 28 Tagen, 6 und 10 Monaten, einer optischen Kontrolle unterzogen, um eventuell vorhandene oder infolge Bewitterung entstandene Fehlstellen, Blasen etc. fotografisch zu dokumentieren und zu protokollieren.

Es zeigte sich, daß der im Spritzverfahren applizierte PCC-Spachtel FS4 der Probefläche D 1 nach dem Ausstrahlen einzelne Fehlstellen in Form von Poren, Durchmesser 1-2 mm, aufwies (s. Abb. 23), die auch von der anschließenden Beschichtung nur zum Teil überdeckt werden konnten.

Die Ursache der Fehlstellen sind mit großer Wahrscheinlichkeit verfahrensimmante Parameter bei der Applikation des Spachtels, wie z.B. Spritzschatten.



Abb. 23: Fehlstellen im PCC-Mörtel nach dem Ausstrahlen

Alle manuell aufgetragenen PCC-Mörtel-/Spachtel füllen die Zwickel zwischen den freiliegenden Kieseln des Waschbetons aus. Auch bei Überschreitung der zulässigen Schichtdicke pro Arbeitsgang war bei keinem Material eine Reißbildung zu erkennen. Veränderungen auf den Oberflächen, die auf eine Alterung hinweisen, konnten nach einem Jahreszyklus nicht festgestellt werden.

3.3.4.5 Verbundverhalten

Die Ermittlung der Haftzugfestigkeit erfolgte nach TP BE-PCC bzw. TP-OS (vgl. Kap. 3.2.5.5) /BMV1/. Die Messung gestaltete sich auf den Probeflächen der Variante "Strukturerhalt" zum Teil sehr schwierig, da keine ebene Auflagefläche zum Aufkleben der Prüfstempel vorhanden war und deren vollflächige Verklebung häufig nur schwer bzw. mit großen Klebermengen zu erreichen war.

Da kein signifikanter Unterschied im Verbundverhalten zwischen den Probeflächen "Strukturerhalt" und "Strukturverlust" festzustellen war, wurden die Ergebnisse aller Probeflächen vom jeweiligen Bemusterungstermin zusammengefaßt.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 24 und Abb. 25) sind die ermittelten Ergebnisse grafisch, die Zahlenwerte sind im Anhang in Tab. 28 und Tab. 29, Seite 115, dargestellt.

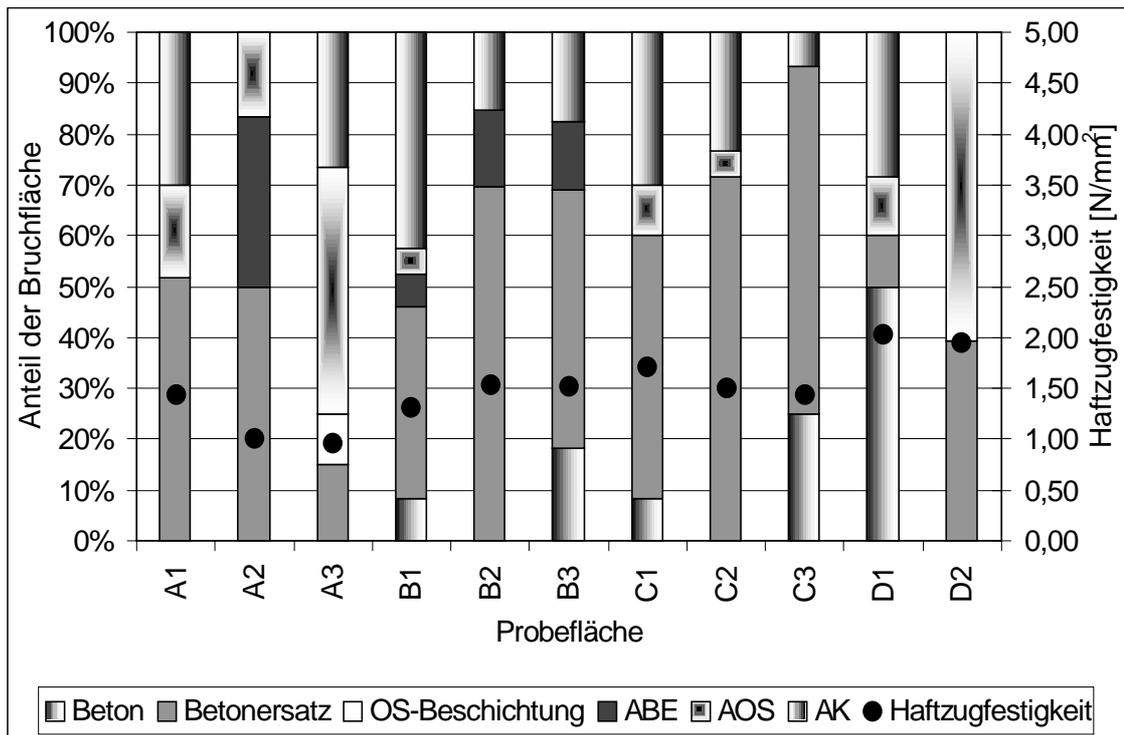


Abb. 24: Haftzugfestigkeit der Probeflächen am Bauwerk im Alter von 28 Tagen

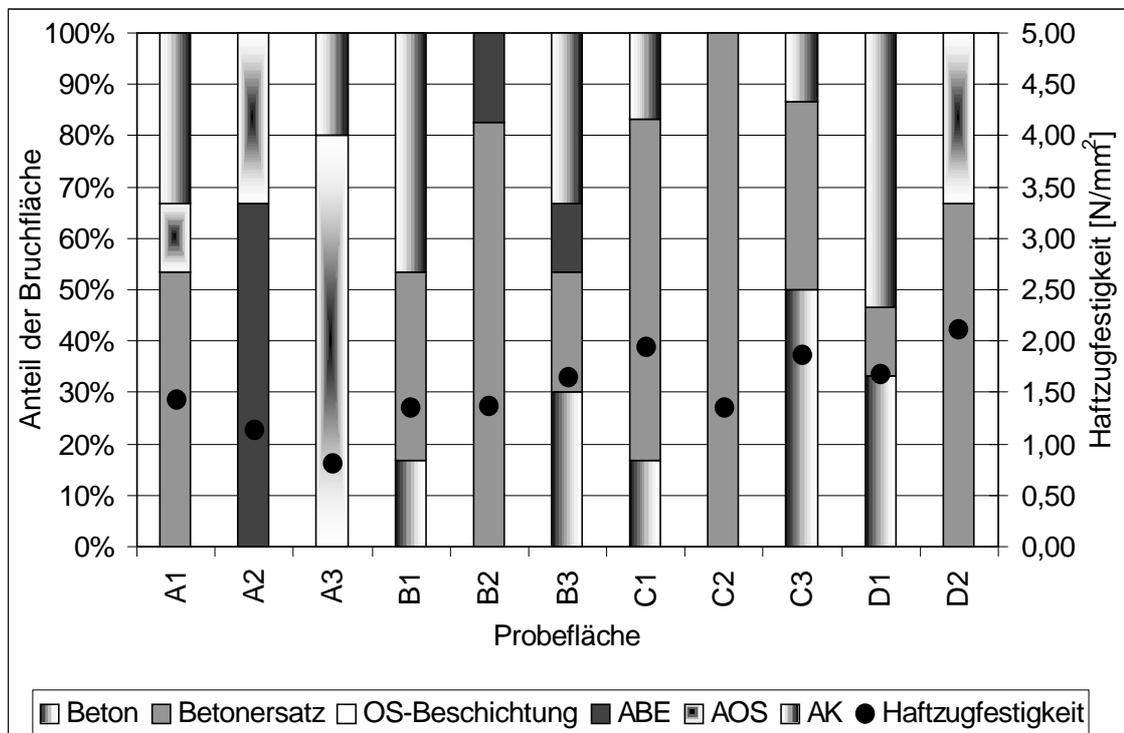


Abb. 25: Haftzugfestigkeit der Probeflächen am Bauwerk im Alter von 10 Monaten

Obwohl die Anforderungen der Regelwerke z.T. unterschritten wurden, kann insgesamt davon ausgegangen werden, daß auf der vorliegenden Waschbetonstruktur keine Verbundprobleme zwischen Untergrund und Instandsetzungssystem vorlagen. Die Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten der Probeflächen lagen zwischen 0,6 und 2,4 N/mm², über alle Probeflächen gemittelt ergab sich eine Haftzugfestigkeit von 1,5 N/mm². Entscheidend ist, daß das Bruchversagen überwiegend im Beton und im Betonersatz erfolgte, d.h. ein Verbundversagen zwischen Waschbetonuntergrund und Betonersatz nicht zu erwarten ist. Weiterhin wurde deutlich, daß der 1-jährige Bewitterungszyklus keinen signifikanten Alterungseinfluß auf die Haftzugwerte verursacht hatte. Auch die Anwendung einer Haftbrücke übte keinen nennenswerten Einfluß auf das Verbundverhalten aus.

3.3.4.6 Strukturuntersuchungen

Zur Aufdeckung ggf. vorhandener struktureller Schwächen der aufgetragenen Systeme der verschiedenen Materialien wurden von den entnommenen Bohrkernen der Bemusterung 1 (nach 28 Tagen) und 3 (nach 10 Monaten) Anschliffe hergestellt.

Die Herstellung der Anschliffe erfolgte nach dem in /Dja1/ und /Kle1/ beschriebenen Verfahren. Dazu wurden die Kerne längs in ca. 1-2 mm dünne Scheiben gesägt und 24 h bei 60°C getrocknet. Danach wurde die Probe unter Vakuum mit farbigem Epoxidharz vergossen. Beim anschließenden Belüften wurden Hohlräume dann durch den Atmosphärendruck mit Harz gefüllt. Nach Aushärtung des Harzes wurde die Probe freigeschliffen und poliert. Durch die Präparation wurden ggf. vorhandene Strukturmängel (Poren, Risse, unausgefüllte Zwickel usw.) sehr gut sichtbar /Jun1/.

Auch Struktur und Aufbau des aufgetragenen Instandsetzungssystem lassen sich anhand der Anschliffe überzeugend optisch darstellen. Insbesondere die dickeren Schichten der Instandsetzungsvariante "Strukturverlust" sind am Anschliff der Probe C 2 (vgl. Abb. 26) sehr gut zu erkennen. Zwischen und bündig mit den Waschbetonzuschlägen ist der gröbere PCC-Mörtel (Größtkorn ≤ 2 mm), darüber der feinere PCC-Spachtel (Größtkorn ≤ 0,6 mm) und darauf die farbige OS 5 / OS-D II Beschichtung zu sehen. Der Anschliff der Probe A 1 (vgl. Abb. 27) zeigt den Aufbau der Instandsetzungsvariante "Strukturerhalt". Der ausgestrahlte PCC-Spachtel zwischen den Waschbetonzuschlägen und die farblose Beschichtung OS 4 / OS-C sind jedoch nur bei näherem Hinsehen erkennbar.

Insgesamt zeigte sich, daß bei PCC-Mörteln / -Spachteln auf Waschbeton i.d.R. keine strukturellen Schwächen (Risse, Poren, unausgefüllte Zwickel) auftreten. Es ist daher davon auszugehen, die Dauerhaftigkeit einer Instandsetzung nicht durch strukturelle Schwächen im aufgetragenen Material beeinträchtigt wird.

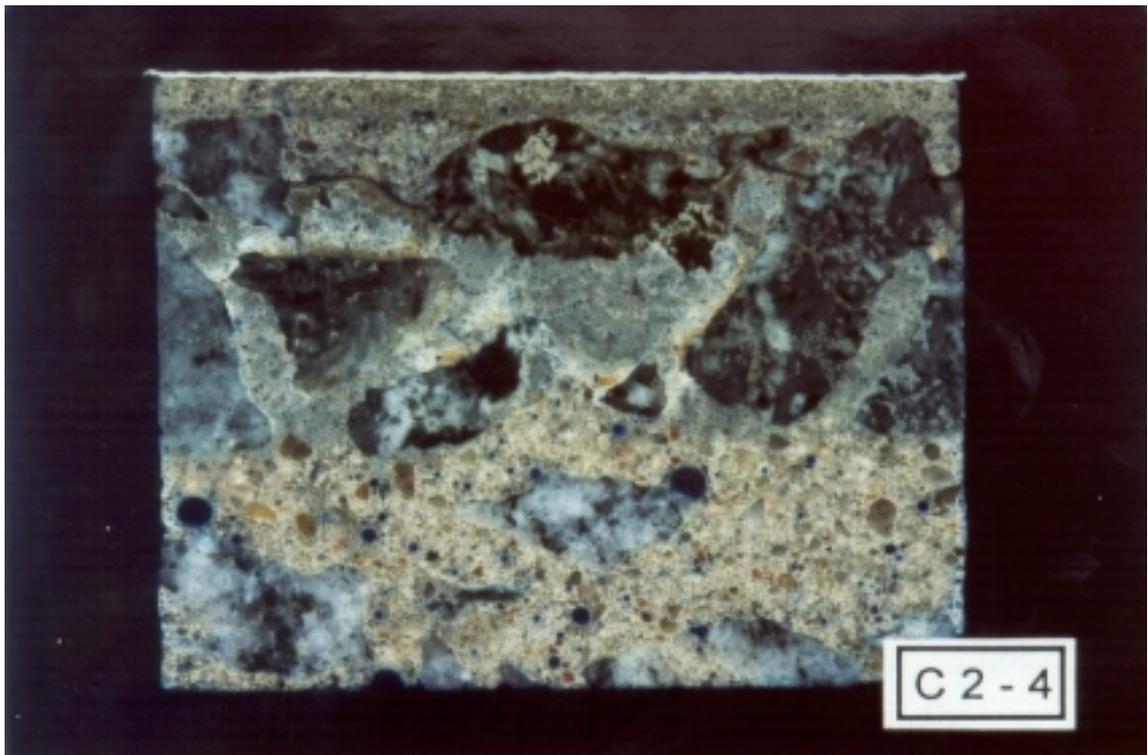


Abb. 26: Anschliff der Probefläche C 2 "Strukturverlust" (Vergrößerung 2-fach)

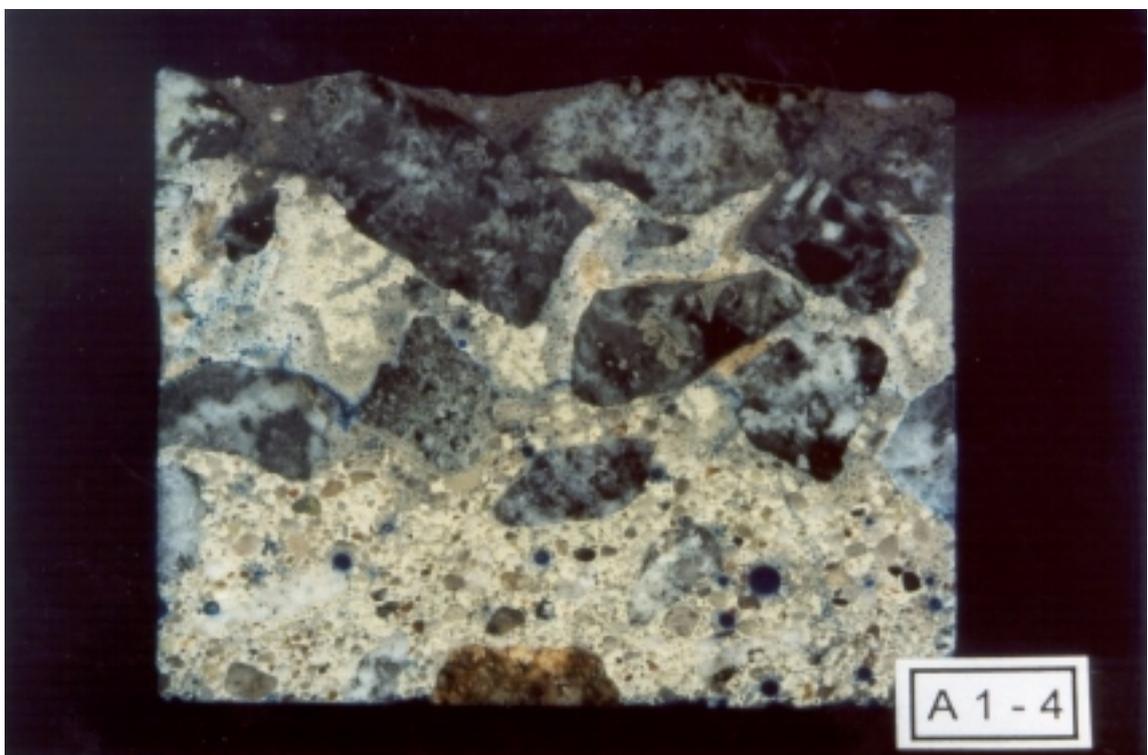


Abb. 27: Anschliff der Probefläche A 1 "Strukturerhalt" (Vergrößerung 2-fach)

3.3.4.7 Schutzwirkung der Oberflächenschutzsysteme

3.3.4.7.1 Karbonatisierung

Bei fachgerechter Applikation der ZTV-SIB geprüften Oberflächenschutzsysteme unter Einhaltung der vorgeschriebenen systemspezifischen Mindestschichtdicke entspricht der Diffusionswiderstand von $sd_{CO_2} \geq 50$ m praktisch einer Diffusionssperre für Kohlendioxid mit $sd_{CO_2} = \infty$ /Klo1/. Durch einen Vergleich von Messungen der Karbonatisierungstiefe nach 28 Tagen und nach ca. 10 Monaten, sollte festgestellt werden, ob die mögliche Schutzwirkung der hier angewandten Instandsetzungssysteme erreicht werden konnte.

Die Messung der Karbonatisierungstiefe erfolgt an jeweils 3 Bohrkernen in Anlehnung an die ZTV-SIB /BMV1/. Hierfür werden die Probekörper gebrochen und die frischen Bruchflächen mit Indikatorlösung besprüht. Als Indikatorlösung wurde eine 1 %ige alkoholische Phenolphthaleinlösung, die ca. 30 % Wasser enthält, verwendet. Deren Farbe schlägt im Bereich des nicht karbonatisierten, alkalischen Betons mit $pH > 9$ auf rotviolett um, während die karbonatisierte Betonrandzone mit pH -Werten $\leq 9,5$ farblos bleibt. Nach 24 Stunden wurde die Karbonatisierungstiefe als Abstand der Farbumschlaggrenze zur Betonoberfläche bestimmt /Gru1/.

Tab. 12: Karbonatisierungstiefe am Bauwerk, gemessen nach 10 Monaten an je 3 Bohrkernen

System	Probefläche	Variante	Werkstoffe			Karbonatisierungstiefe [mm]
			PCC-Mörtel	PCC-Spachtel	OS-Beschichtung	
1	A 1	II	GM1		OS 4-1	1,0
	A 2	III	GM1	FS1	OS 5-1	1,0
	A 3	II		FS1	OS 5-1	0,5
2	B 1	II	GM2		OS 4-2	1,0
	B 2	III	GM2	FS2	OS 5-2	1,0
	B 3	II		FS2	OS 4-2	1,5
3	C 1	II	GM3		OS 4-3	0,2
	C 2	III	GM3	FS3	OS 5-3	0
	C 3	II		FS3	OS 4-3	0,1
4	D 1	II		FS4	OS 4-4	2,0
	D 2	III	GM4	FS4	OS 5-4	0,5

Die ermittelten Ergebnisse der Karbonatisierungstiefe variieren stark. Während an der Probefläche C 2 auch nach 10 Monaten keine Karbonatisierung am PCC-Mörtel festzustellen ist, ist der PCC-Spachtel auf der Probefläche D 1 nach dieser Zeit nahezu vollständig durchkarbonatisiert (vgl. Abb. 28).



Abb. 28: Verlauf der Karbonatisierungsfrent nach 10 Monaten (Vergrößerung 2-fach)

Unter Berücksichtigung des relativ kurzen Bewertungszeitraumes erlauben die Messungen nur eine erste Abschätzung der Schutzwirkung. Anhand der vorliegenden Ergebnisse wird jedoch deutlich, daß die aufgetragenen Oberflächenschutzsysteme keinen vollständigen Schutz vor Karbonatisierung sicherstellen konnten. Für eine erste Ursachenklärung wurden die nachfolgenden Messungen der Schichtdicken durchgeführt.

3.3.4.7.2 Bestimmung der Schichtdicken von OS-Beschichtungen

Da die in Kap. 2.4.2 aufgeführten Meßgeräte zur Schichtdickenmessung auf strukturierten oder ausgewaschenen Oberflächen nicht anwendbar sind, wurden die Schichtdicken der applizierten Oberflächenschutzsysteme an Anschliffen der entnommenen Bohrkernmikroskopisch ermittelt. Zur sicheren visuellen Erfassung der zum Teil sehr dünnen farblosen Schichten erfolgte die Messung bei 50facher Vergrößerung mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$, rechtwinklig zum Untergrund.

Es wurden je Bohrkern zwei Anschliffe hergestellt. Die Länge der auswertbaren Beschichtungsstrecke der Anschliffe lag daher bei ca. 2 x 50 mm. Bei einem gewählten Meßabstand von 1 mm standen daher als Stichprobe für die statistische Auswertung jeweils ca. 100 Einzelwerte zur Verfügung. Die Auswertung erfolgte gemäß den Vorgaben der Regelwerke unter Zugrundelegung einer Normalverteilung der Meßwerte.

Obwohl diese sehr sorgfältige Auswertung nur an jeweils 3 Bohrkernen/Probefläche durchgeführt werden konnte, erlaubt sie doch eine erste, vergleichsweise vertrauenswürdige Auskunft zu den tatsächlich erzielten Schichtdicken.

Tab. 13: Schichtdicken der Probeflächen am Bauwerk, Variante "Strukturerhalt"

Kennwert	Einheit	A 1	B 1	C 1	D 1
$d_{\min s}$	μm	47	35	3	34
ssa	-	24	39	83	37
MW	μm	87	99	139	95

Die Anforderung der Regelwerke an die systemspezifische Mindestschichtdicke, $d_{\min s} \geq 80 \mu\text{m}$, wird hier mit keinem der eingesetzten OS-C/OS 4 Systeme annähernd erreicht .

Tab. 14: Schichtdicken der Probeflächen am Bauwerk, Variante "Strukturverlust"

Kennwert	Einheit	A 2	B 2	C 2	D 2
$d_{\min s}$	μm	163	81	319	15
ssa	-	47	44	53	105
MW	μm	240	154	406	188

Bei den verwendeten OS-D II / OS 5 Systemen wird die Anforderung an die systemspezifische Mindestschichtdicke, $d_{\min s} \geq 300 \mu\text{m}$, nur an Probefläche C 2 erreicht.

Auffällig ist, daß sich die Beschichtungsergebnisse auf den rauhen Untergründen "Strukturerhalt" und den ebenen Untergründen "Strukturverlust" qualitativ nicht signifikant unterscheiden. Dieses Ergebnis widerspricht völlig den Erwartungen, da davon ausgegangen wurde, daß auf diesen ebenen Oberfläche die Ausbildung eines gleichmäßigen Films unter Einhaltung der systemspezifischen Mindestschichtdicke problemlos möglich und Stand der Technik sein sollte.

Mögliche Ursache für die Unterschreitung der systemspezifischen Mindestschichtdicken kann eine zu geringe Auftragsmenge des flüssigen Beschichtungsstoffes sein. Ob lediglich der Kontrolle der Auftragsmengen durch die Verarbeiter nicht die nötige Aufmerksamkeit gewidmet wurde oder ob die Auftragsmenge grundsätzlich gar keine verwertbare sichere Aussage zur Schichtdicke der Beschichtung ermöglicht, bedarf insbesondere für die Variante "Strukturerhalt" einer vertiefenden Untersuchung.

In erster Näherung ist eine Korrelation der Karbonatisierungstiefe mit der Schichtdicke der Beschichtung festzustellen. An der Probefläche C 2, bei der als einzige die systemspezifische Mindestschichtdicke eingehalten wurde, war nach 10 Monaten keine Karbonatisierung unter der Beschichtung aufgetreten.

Die Messungen der Karbonatisierungstiefe an den übrigen Probeflächen weisen darauf hin, daß die aufgetragenen Oberflächenschutzsysteme aufgrund der Unterschreitung der systemspezifischen Mindestschichtdicken offenbar auch im Bereich der PCC-Mörtel-/Spachtel keinen ausreichenden Schutz vor Karbonatisierung darstellen.

Die Anforderung an die systemspezifische Mindestschichtdicke wurde sowohl beim "Strukturerhalt" als auch beim "Strukturverlust" von einem Großteil aller Meßwerte zum Teil weit unterschritten. Die vergleichsweise geringe Gleichmäßigkeit der Beschichtungen spiegelt sich in einer hohen Standardabweichung und auch in einer breiten Streuung der Meßwerte in den Histogrammen, bzw. der Boxhöhe und der Federbalkenlänge der Boxplots wider.

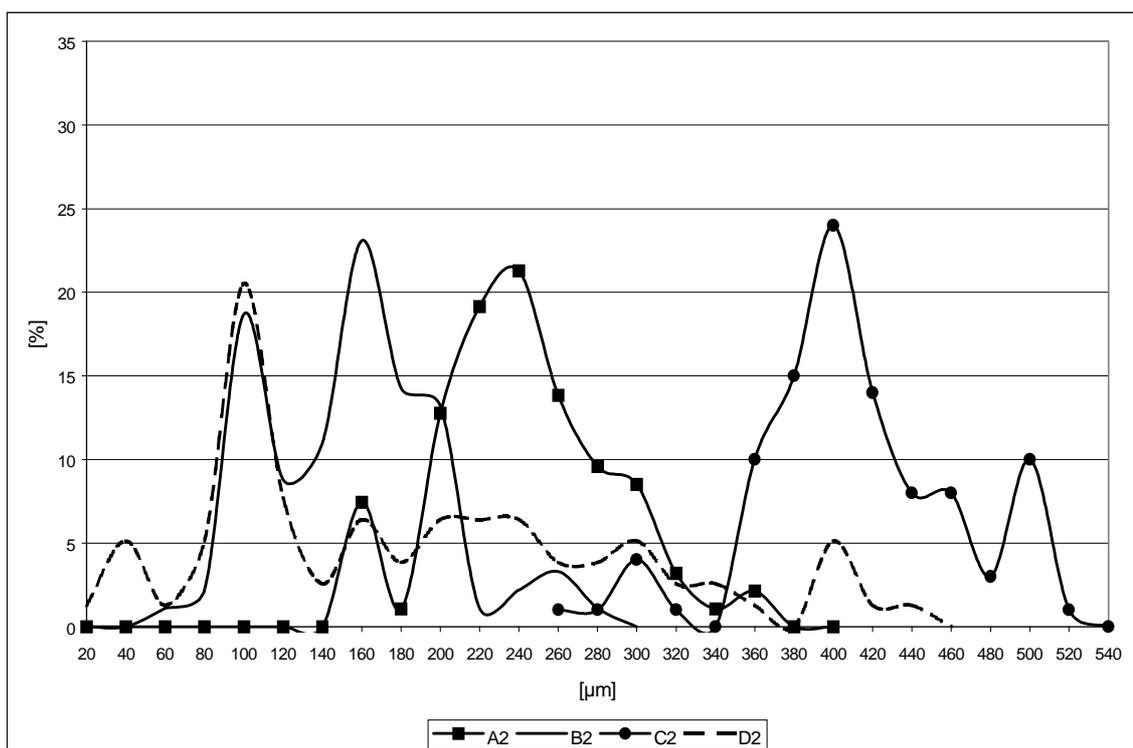


Abb. 29: Histogramm der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturverlust"

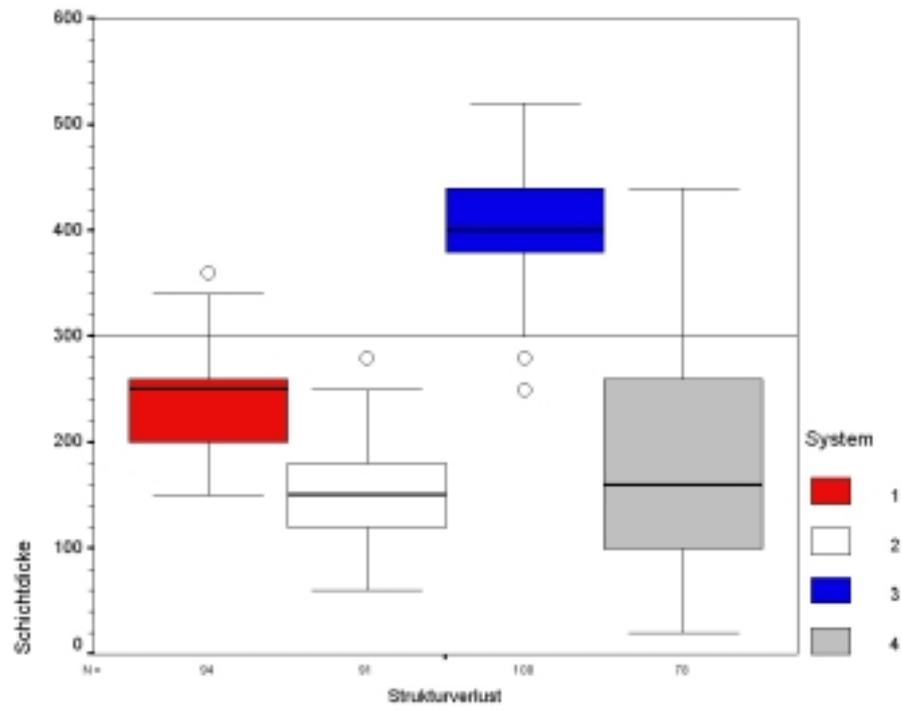


Abb. 30: Verteilung der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturverlust"

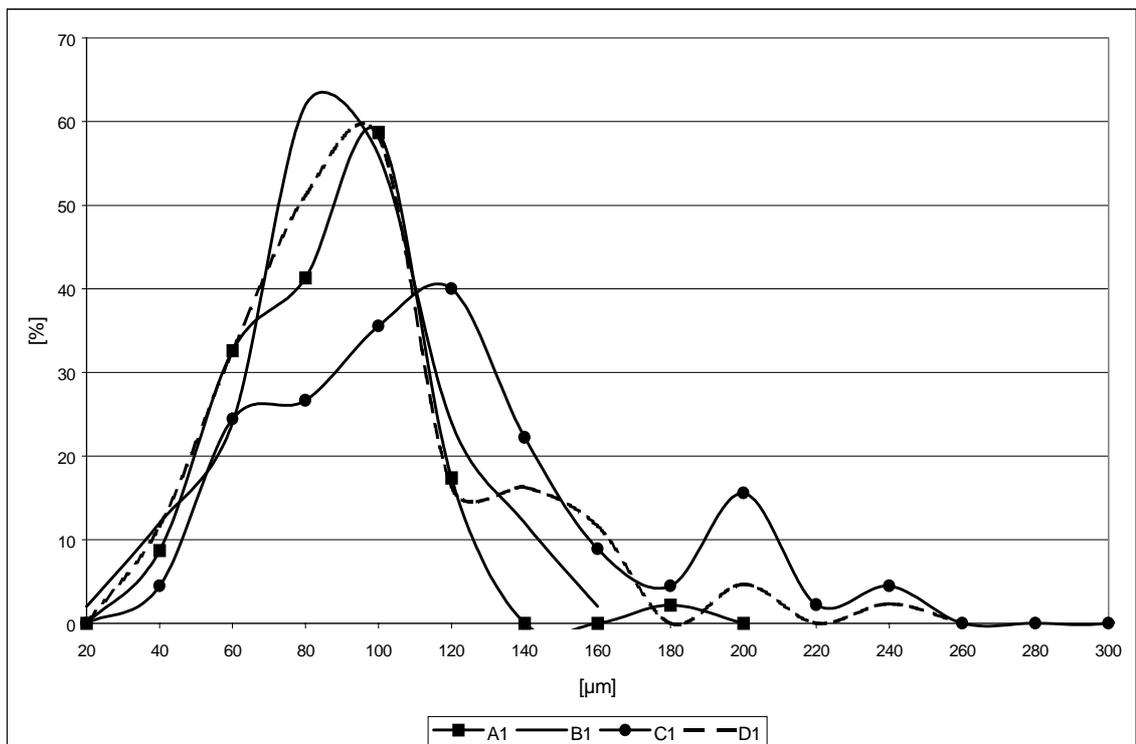


Abb. 31: Histogramm der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturerhalt"

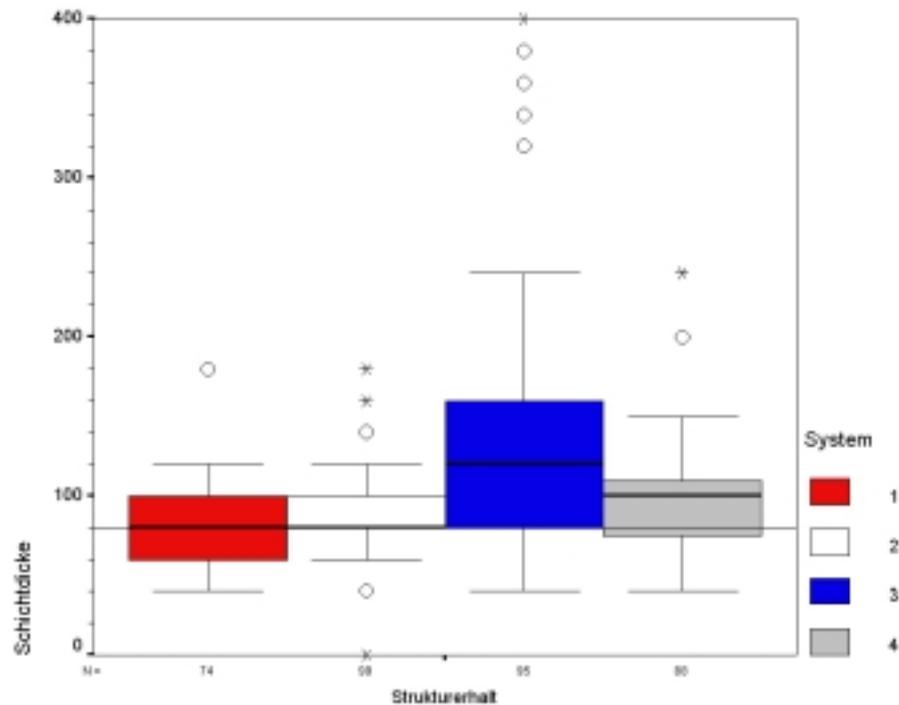


Abb. 32: Verteilung der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturerhalt"

Betrachtet man die Histogramme, so wird deutlich, daß die Verteilung der gemessenen Schichtdicken insbesondere an den Probeflächen der Variante III "Strukturerhalt" nicht der Normalverteilung folgt. Wesentlich Ursache dafür ist die rauhe Oberflächenstruktur, die durch Schichtdickenmaxima in den Tälern und Minima auf den Zuschlagsspitzen naturgemäß schiefe bzw. mehrgipflige Verteilungen nach sich zieht. Die vorliegende Mischverteilung zwischen den Kieselspitzen und den Zwischenräumen beeinflusst eindeutig das Verteilungsergebnis, was bei der Probefläche D2 in Abb. 29 besonders ausgeprägt ist.

Die Gegenüberstellung von Histogrammen und Boxplots zeigt aber deutlich die Vorteile der Darstellung von Verteilungen mittels Boxplots. Neben der insgesamt besseren Übersichtlichkeit werden Schiefen einer Verteilung durch die außermittige Lage des Medians in der Box, z.B. bei den Probeflächen B und D in Abb. 32, sehr gut verdeutlicht. Auch die Streuung geht aus der Darstellung durch die Länge der Box und der Federbalken klar hervor, z.B. die vergleichsweise breite Streuung der Probeflächen "Strukturverlust" und hier insbesondere der Probefläche D.

3.3.5 ERKENNTNISSE AUS DEN UNTERSUCHUNGEN AM BAUWERK

Die Ergebnisse des 2. Untersuchungsschrittes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Verwendung einer Haftbrücke führt nicht zu einer Verbundsteigerung zwischen Unterbeton und PCC-Mörtel/-Spachtel.
2. Das manuelle Applikation der PCC-Mörtel/-Spachtel stellt technisch kein Problem dar. Die Materialien füllen die Zwickel zwischen den Kieseln gut aus und erhärten i.d.R. rißfrei. Mit der Spritzapplikation ist die erforderliche, vergleichsweise geringe Schichtdicke des Mörtels nicht zu erzielen. Ein zusätzlicher Arbeitsgang, zur Entfernung überschüssigen Materials war daher erforderlich. Nach dem Ausstrahlen zeigte sich auch, daß das Ausfüllen der Kieselzwischenräume nicht vollständig gewährleistet ist (vgl. Abb. 23).
3. Auch am Bauwerk ist das Freilegen der Waschbetonstruktur mittels Nebelsandstrahlen bei PCC-Spachteln und auch bei PCC-Mörteln nach entsprechender Einarbeitung einfach und präzise durchführbar. Der optische Eindruck der Waschbetonoberfläche unter Reduzierung der Rauhtiefe wird insbesondere mit den PCC-Spachteln weitgehend erhalten.
4. Die mittlere Haftzugfestigkeit lag am Bauwerk mit $1,5 \text{ N/mm}^2$ deutlich niedriger als bei den vorhergehenden Laboruntersuchungen mit $2,75 \text{ N/mm}^2$. Das Versagen erfolgte jedoch überwiegend im Unterbeton oder im Betonersatz. Ein Verbundversagen zwischen Waschbetonuntergrund und Betonersatz war daher nicht festzustellen.
5. Die in den Regelwerken vorgeschriebenen systemspezifischen Mindestschichtdicken, wurden unabhängig von der ausgeführten Instandsetzungsvariante nur an einer Probefläche erreicht. Auffällig war weiterhin die geringe Gleichmäßigkeit, die sich in der starken Streuung der Meßwerte widerspiegelt.
6. Da die Schichtdickenmeßwerte i.d.R. offensichtlich nicht der Gauß'schen Normalverteilung folgen, ist eine statistische Auswertung unter Ermittlung der tatsächlichen Verteilungsart erforderlich.
7. Die durchgeführten Messungen der Karbonatisierungstiefe korrelieren in erster Näherung mit den Ergebnissen der Schichtdickenmessungen. An einer Probefläche, mit eingehaltener systemspezifischer Mindestschichtdicke der OS-Beschichtung war keine Karbonatisierung unter der Beschichtung vorhanden. Bei den übrigen Probeflächen trat aufgrund der Unterschreitung der systemspezifischen Mindestschichtdicken, jeweils Karbonatisierung auf.

Für die Beurteilung von Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen folgt aus den Ergebnissen der Bauwerksuntersuchungen noch die vertiefende Klärung folgender Fragestellungen:

- Variation der Kornform der Waschbetonoberfläche durch Verwendung runder Zuschläge
- Einfluß von Kornform und Rauhtiefe der Grundkörper auf Struktur und Verbund der PCC-Mörtel/-Spachtel
- Eignung von PCC-Mörteln und PCC-Spachteln hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Ausstrahlzeit und Verbund
- Einfluß des Untergrunds (Kornform und Rauhtiefe), der Eigenschaften, Auftragsmenge und Anzahl der Deckschichten sowie des Applikationsverfahrens der Beschichtung auf deren Schichtdicke und Gleichmäßigkeit
- Anwendung und Auswahl statistischer Auswerteverfahren auf die Ergebnisse der Schichtdickenmessungen

Dieser Klärung ist der 3. Untersuchungsschritt, das nachfolgende Kapitel 3.4, gewidmet.

3.4 VERTIEFENDE UNTERSUCHUNGEN IM LABOR

Aufgrund der in den ersten beiden Untersuchungsschritten gesammelten Erkenntnisse ist davon auszugehen, daß die Ausführung der Variante III, "Strukturverlust", trotz der Unterschreitung der systemspezifischen Mindestschichtdicken am Bauwerk, im Ergebnis der üblichen Betoninstandsetzung entspricht. Die erhöhte Rauhtiefe des Untergrundes hat keinen negativen Einfluß auf den Erfolg der Instandsetzungsmaßnahme. Vertiefende Untersuchungen dieser Instandsetzungsvariante waren daher nicht erforderlich und im folgenden 3. Schritt wurden ausschließlich Untersuchungen zur Variante II "Strukturerhalt" durchgeführt.

3.4.1 WASCHBETONGRUNDKÖRPER

Für diesen Untersuchungsschritt wurden weiterhin verschiedene Arten von Waschbetongrundkörpern benötigt, die im Fertigteilwerk nach folgender Rezeptur hergestellt wurden:

Tab. 15: Rezeptur der Waschbetongrundkörper

Bestandteil	Grundkörper Kies	Grundkörper Splitt
	[kg/m ³]	
Zement	357	363
Wasser	181	184
Zuschlag ≤ 32 mm	1841	1881
W/Z-Wert	0,5	0,5

Die Platten wurden im Negativverfahren unter Verwendung eines Kontaktverzögerers betoniert, nach 7 Tagen entschalt und anschließend mit Bürste und Wasserstrahl ausgewaschen. Bis zur Applikation der PCC-Mörtel-/Spachtel lagerten die Grundkörper unter Wasser. Wegen des hohen Gewichts, wurden die Abmessungen der Grundkörper gegenüber den Voruntersuchungen auf 50 x 30 x 4 cm reduziert.

Um den Einfluß der Rauhtiefe zu klären, wurden Waschbetongrundkörper mit mittleren Rauhtiefen von 4, 6 und 8 mm hergestellt. Damit ließen sich gleichzeitig unterschiedlich stark verwitterte Waschbetonoberflächen simulieren. Die Abbildungen Abb. 33 und Abb. 34 geben einen Eindruck der Oberflächen der verwendeten Waschbetongrundkörper.



Abb. 33: Waschbetongrundkörper Kies, Rauhtiefe ca. 6 mm

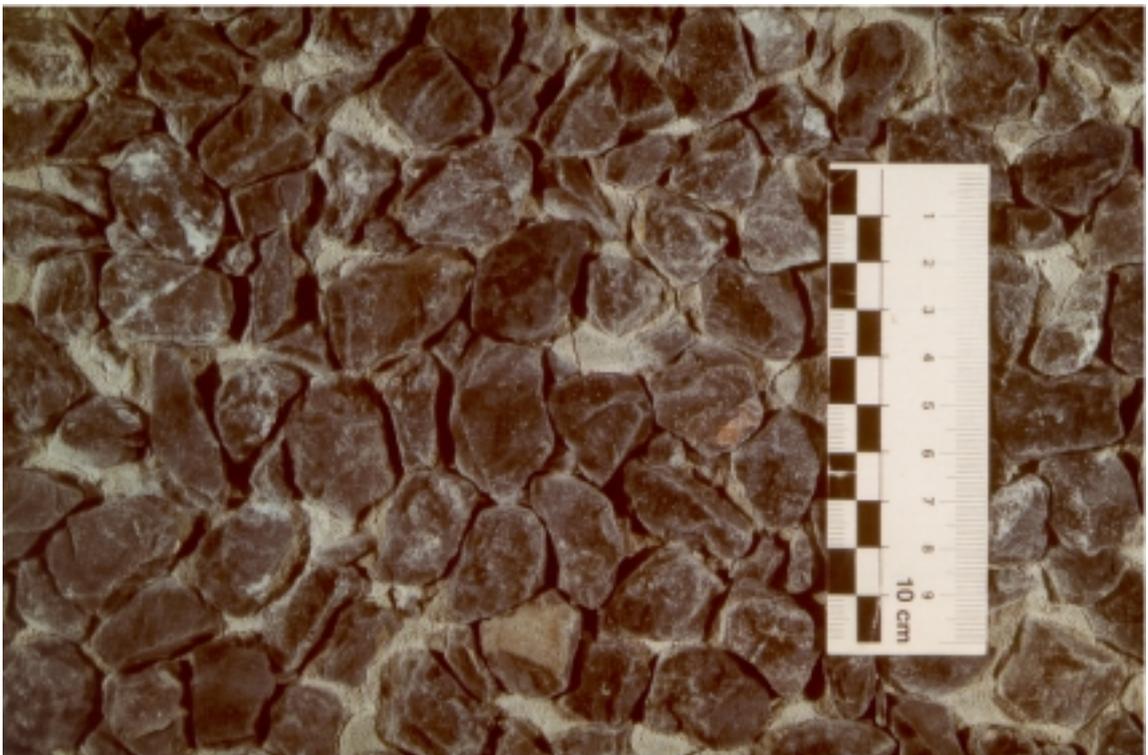


Abb. 34: Waschbetongrundkörper Splitt, Rauhtiefe ca. 6 mm

3.4.2 INSTANDSETZUNGSWERKSTOFFE

Da die grundsätzliche Eignung der verwendeten ZTV-SIB geprüften Werkstoffe in den vorangegangenen Untersuchungsschritten 3.2 und 3.3 nachgewiesen wurde, kamen die gleichen Werkstoffe wie in den Bauwerksuntersuchungen (vgl. Kap. 3.3.2) zur Anwendung. Auf die Verwendung von Haftbrücken wurde verzichtet.

Von den vier verschiedenen Herstellern wurden folgende Werkstoffe verwandt:

- PCC-Grobmörtel, Größtkorn des Zuschlages ≤ 2 mm
- PCC-Feinspachtel, Größtkorn des Zuschlages $\leq 0,6$ mm
- farblose/lasierende Beschichtungen OS-C/OS 4: drei wäßrige Acrylat-Dispersionen (OS 4-1-3), ein in Lösungsmittel gelöstes Acrylharz (OS 4-4).

3.4.3 APPLIKATION DER OBERFLÄCHENSCHUTZSYSTEME

Die Beschichtung der Probekörper wurde durch erfahrenes Fachpersonal gemäß den Vorgaben der technischen Merkblätter wie nachfolgend beschrieben durchgeführt:

1. Zur Schaffung praxisnaher Bedingungen wurden die Waschbetongrundkörper vertikal montiert.
2. Trotz Wasserlagerung ggf. vorhandene Verschmutzungen wurden mittels Kaltwasserstrahlen entfernt.
3. Wie bei den vorangegangenen Untersuchungsschritten wurde bei der Herstellung der Frischmörtel grundsätzlich die höchst zulässige Wassermenge verwendet, um eine gute Verarbeitbarkeit auf den rauen Waschbetonoberflächen zu gewährleisten. Bei den sehr steifen PCC-Mörteln mußte die zulässige Wassermenge z.T. überschritten werden, um eine applizierbare Konsistenz einzustellen.
4. Die Applikation der PCC-Mörtel/-Spachtel erfolgte bei allen Grundkörpern mittels Metallreibbrett in einem Arbeitsgang, wobei der Mörtel oberflächenbündig mit den Kieseln abgezogen werden sollte. Nach der erforderlichen Wartezeit erfolgte das Abreiben mittels Neopren-Reibbrett.
5. Da in den Untersuchungsschritten 1 und 2 der Zeitpunkt zum Freilegen der Oberfläche nach einer Erhärtungszeit von 24 h ohne Einfluß auf die Strahldauer flexibel wählbar war, erfolgte das Ausstrahlen (Verfahrensweise s. Kap. 3.2.4) grundsätzlich nach 24 Stunden. Nach dem Ausstrahlen wiesen die Verbundkörper eine Rauftiefe von ca. 2 mm auf.

6. Nach der Reinigung der Proben mittels Druckluft erfolgte die Applikation der Beschichtung manuell mittels kurzfloriger Neoprenrolle und im Spritzverfahren mit der Fließbecher-Lackierpistole. Ziel war es, die vorgeschriebenen Auftragsmengen auf den glatten Oberflächen einzuhalten und auf den Waschbetonoberflächen entsprechend der Rauhtiefe des Untergrundes um die in Kap. 2.4.1 ermittelten Faktoren von ca. 1,5 i.M. zu erhöhen.
7. Da die Erzielung der geforderten systemspezifischen Mindestschichtdicke auf rauhen Untergründen erwartungsgemäß erschwert ist, wurden jeweils parallel Meßreihen mit dem Regelaufbau der Beschichtung, bestehend aus Grundierung (optional) und zwei Deckschichten, sowie nach Rücksprache mit den Herstellern mit einer zusätzlichen dritten Deckschicht hergestellt.

3.4.4 ART UND ANZAHL DER LABORPROBEKÖRPER

Zur Ermittlung der Eignung von PCC-Mörteln /-Spachteln hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Ausstrahlzeit und zur Feststellung des Einflusses von Kornform und Rauhtiefe der Grundkörper auf Struktur und Verbund der PCC-Mörtel/-Spachtel wurden folgende Probekörper hergestellt:

- Waschbetonverbundkörper mit nicht ausgestrahltem, bündig gespachteltem PCC-Mörtel/-Spachtel, deren Oberfläche prinzipiell einer üblichen glatten Betonoberfläche entspricht

Zur Feststellung des Einflusses von Rauheit und Struktur des Untergrundes, der Auftragsmenge bzw. der Anzahl der Deckschichten und des Applikationsverfahrens auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung sind vergleichende Untersuchungen an glatten und rauhen Oberflächen vorgesehen. Hierfür wurden daher folgende Probekörperarten angefertigt:

- Waschbetongrundkörper mit Oberflächenschutzbeschichtung unter Verzicht auf Egalisierung des Untergrundes mit PCC-Mörteln/-Spachteln, da diese Verfahrensweise in der Praxis häufig zur Instandsetzung von Waschbetonoberflächen angewandt wird
- Waschbetonverbundkörper mit Oberflächenschutzbeschichtung auf ausgestrahltem, PCC-Spachtel, d.h. Instandsetzungsvariante II "Strukturerhalt"
- Waschbetonverbundkörper mit Oberflächenschutzbeschichtung auf nicht ausgestrahltem, bündig gespachteltem PCC-Spachtel, deren Oberfläche prinzipiell einer üblichen glatten Betonoberfläche entspricht, zur Schichtdickenkontrolle
- Faserzementplatten mit Oberflächenschutzbeschichtung, die nach ZTV-SIB als Untergrund für Schichtdickenmessungen im Labor vorgeschrieben sind

Für die verschiedenen Untersuchungen wurden mit den Werkstoffen der vier verschiedenen Hersteller jeweils die in den folgenden Tabellen dargestellten Probekörper angefertigt:

Tab. 16: Art und Anzahl der Probekörper für den 3. Untersuchungsschritt

Werkstoffe	Anzahl Deck-schichten	Applikation Beschichtung	Untergrund			
			Grundkörper	Verbundkörper ausgestrahlt	Verbundkörper bündig gespachtelt	Faserzement
GM	-	-	-	-	6	-
FS	-	-	-	-	6	-
FS+OS-Beschichtung	2	rollen	-	18	4	-
		spritzen	-	10	4	-
FS+OS-Beschichtung	3	rollen	-	10	4	-
		spritzen	-	10	4	-
OS-Beschichtung	2	rollen	-	-	-	2
		spritzen	8	-	-	2
OS-Beschichtung	3	rollen	-	-	-	2
		spritzen	8	-	-	2
Gesamt (x 4 Hersteller)			100 (400)			

3.4.5 UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

3.4.5.1 Materialkennwerte

Auch in diesem Untersuchungsschritt wurde bei den PCC-Mörteln und -Spachteln am Frischmörtel Konsistenz, Rohdichte und Luftporengehalt nach TP BE-PCC, Abschn. 4.3 ermittelt, am Festmörtel wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit gemäß TP BE-PCC, Abschn. 5.4 ermittelt, deren Ergebnisse in den folgenden Tabellen dargestellt sind.

Tab. 17: Materialkennwerte der PCC-Mörtel GM (MW einer Meßserie)

System	Ausbreitmaß		Rohdichte		LP-Gehalt		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
	[cm]		[kg/dm ³]		[%]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Bezugs-wert	Mess-wert	Bezugs-wert	Mess-wert	Bezugs-wert	Mess-wert	Bezugs-wert	Mess-wert	Bezugs-wert	Mess-wert
1	14,1	14,0	2,201	2,231	6,4	4,1	12,1	11,9	61,4	56,4
2	14,8	14,8	2,085	1,897	5,5	9,0	10,4	10,6	40,0	36,8
3	15,0	15,3	2,120	2,100	7,8	8,8	10,0	9,9	55,4	54,0
4	12,5	12,7	2,031	1,975	7,9	9,0	11,0	11,4	53,0	53,8

Tab. 18: Materialkennwerte der PCC-Spachtel FS (MW aus 4 Meßserien)

System	Ausbreitmaß		Rohdichte		LP-Gehalt		Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
	[cm]		[kg/dm ³]		[%]		[N/mm ²]		[N/mm ²]	
	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert	Bezugswert	Messwert
1	16,6	16,2	1,960	1,989	12,0	9,5	12,1	10,7	42,9	37,4
2	15,6	15,5	1,985	1,851	7,0	14,1	9,8	10,3	34,2	33,2
3	17,6	17,3	2,048	2,056	5,9	4,4	7,4	10,0	40,0	45,2
4	17,4	17,5	1,956	1,930	6,0	8,2	12,2	12,0	36,6	33,7

An den Oberflächenschutzbeschichtungen wurden der Festkörpergehalt nach TP OS Abschn. 2.1 und die Dichte nach TP OS Abschn. 2.4 ermittelt, deren Ergebnisse in der folgenden Tabelle, Tab. 19, dargestellt sind

Tab. 19: Materialkennwerte der Oberflächenschutzbeschichtungen (MW aus 4 Meßserien)

System	OS-Beschichtung	Festkörpergehalt		Dichte	
		[%]		[g/cm ³]	
		Bezugswert	Meßwert	Bezugswert	Meßwert
1	OS 4-1	34	40	1,00	1,05
2	OS 4-2	k.A.	46	1,10	1,08
3	OS 4-3	45	51	1,30	1,33
4	OS 4-4	k.A.	25	0,90	0,91

Die Abweichungen von den Bezugswerten der zugehörigen technischen Merkblätter bewegen sich in einem Rahmen, der an der Identität der Werkstoffe keinen Zweifel erfordert und überwiegend den Toleranzen der langjährigen Fremdüberwachung entspricht.

3.4.5.2 Applikation der PCC-Mörtel /-Spachtel

Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, d.h. des manuellen Einarbeitens der Materialien in die Waschbetonstruktur, wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

- Die Kornform der Waschbetonzuschläge hat keinen signifikanten Einfluß auf die Verarbeitbarkeit der PCC-Spachtel, da keine Unterschiede im Kraft- oder Zeitaufwand bei der Applikation feststellbar waren.

- Nach Aussage des erfahrenen Verarbeiters, der alle PCC-Mörtel-/Spachtel appliziert hat, ist die Verarbeitbarkeit maßgeblich von der Konsistenz der Mörtel abhängig und daher bei den steiferen PCC-Mörteln ($a = 12,5 - 14,8$ cm) deutlich zeit- und kraftaufwendiger als bei den weicheren PCC-Spachteln ($a = 15,6 - 17,6$ cm).
- Aufgrund des Größtkorns von ≥ 2 mm ist mit den gröbereren PCC-Mörteln die Herstellung von Schichtdicken ≤ 2 mm nicht möglich, wodurch das Abziehen des Mörtels bündig mit den Spitzen der Waschbetonzuschläge verhindert wurde.
- Die Kohäsion der PCC-Mörtel ist deutlich höher, als die Haftung am Untergrund, so daß das Abziehen bündig mit den Zuschlagspitzen insbesondere bei Oberflächen mit rundem Korn zum teilweisen Ablösen des Mörtels von der Waschbetonoberfläche führte.
- Die visuelle Begutachtung der ausgestrahlten Oberflächen zeigte, daß sowohl die PCC-Mörtel als auch die PCC-Spachtel unabhängig von der in einem Arbeitsgang aufgetragenen Schichtdicke vollkommen rißfrei erhärteten.

3.4.5.3 Freilegen der Waschbetonstruktur

Der zeitliche Aufwand zur Freilegung der Waschbetonstruktur variierte sehr stark. Die Zusammenfassung der Meßergebnisse ist in den folgenden Tabellen, Tab. 20 und Tab. 21, dargestellt:

Tab. 20: Ausstrahlzeiten der PCC-Mörtel zur Freilegung der Waschbetonstruktur

System	PCC-Mörtel	(min/m ²)/mm Schichtdicke
1	GM1	270
2	GM2	133
3	GM3	140
4	GM4	130

Tab. 21: Ausstrahlzeiten der PCC-Spachtel zur Freilegung der Waschbetonstruktur

System	PCC-Spachtel	(min/m ²)/mm Schichtdicke
1	FS1	10
2	FS2	17
3	FS3	7
4	FS4	16

Während der Zeitaufwand zur Freilegung der Waschbetonstruktur bei den PCC-Spachteln mit 7 - 17 min/m² je mm Schichtdicke ungefähr den Ergebnissen der Voruntersuchungen (s. Kap. 3.2.5.3) entspricht, ist das Ausstrahlen der PCC-Mörtel mit 130 - 270 min/m² je mm Schichtdicke nicht baustellentauglich durchführbar.

Die extreme Erhöhung des Zeitaufwands zeigt, daß der Zeitpunkt zum Ausstrahlen bei den PCC-Mörteln stark vom Erhärtungsgrad abhängig und damit nicht zeitlich flexibel ist. Zusätzliche Versuche zeigten, daß nach ca. 6 h Erhärtungszeit Ausstrahlzeiten von ca. 30 min/m² je mm Schichtdicke möglich sind.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Ausstrahlen der PCC-Spachtel ist vollkommen unproblematisch. Das Verfahren ist nach einer Erhärtungszeit von 24 h zeitlich flexibel und mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand wirtschaftlich durchführbar.
- Das Abziehen bündig mit den Kieselspitzen war bei den PCC-Mörteln nicht möglich, so daß die Waschbetonzuschläge mit ca. 2 mm PCC-Mörtel überdeckt waren und dadurch insgesamt ca. 4 mm auszustrahlen war. Die angegebenen Ausstrahlzeiten pro m² je mm Schichtdicke vervierfachen sich daher und stellen einen unzumutbaren Aufwand zur Freilegung der Waschbetonstruktur dar.
- Bei den PCC-Mörteln war das Ausstrahlen bereits nach 24 h mit extrem hohen Aufwand verbunden (vgl. aber Kap. 3.3.4.3), d.h. das Zeitfenster für wirtschaftlich vertretbare Ausstrahlzeiten ist relativ klein und muß erst in Vorversuchen ermittelt werden.
- wie Abb. 35 zeigt, werden die größeren Zuschläge der PCC-Mörtel durch das Strahlen freigelegt und verändern maßgeblich das Erscheinungsbild der Waschbetonoberfläche.

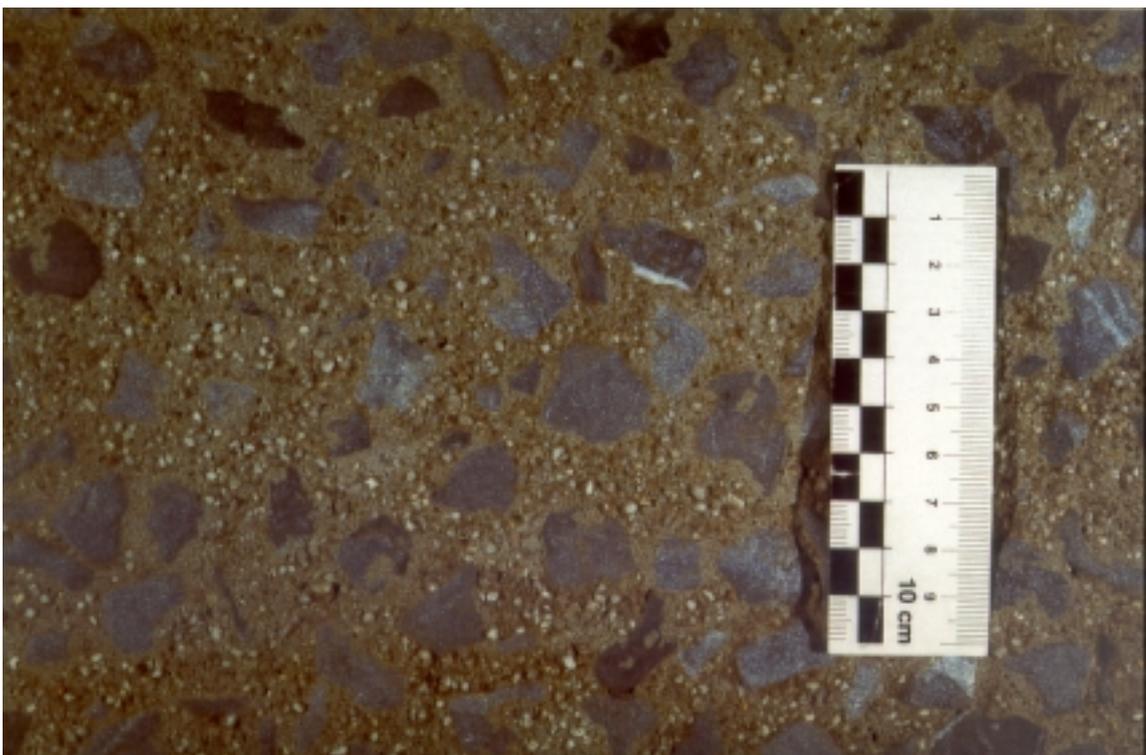


Abb. 35: Oberfläche eines ausgestrahlten PCC-Mörtels mit freigelegtem Grobzuschlag

Die Abbildungen Abb. 36 und Abb. 37 zeigen die Oberflächen von ausgestrahlten und bündig gespachtelten Verbundkörpern.



Abb. 36: Verbundkörper Kies mit ausgestrahltem/bündig gespachteltem PCC-Spachtel



Abb. 37: Verbundkörper Splitt mit ausgestrahltem/bündig gespachteltem PCC-Spachtel

3.4.5.4 Applikation der Oberflächenschutzbeschichtung

Die Applikation der Beschichtungen auf Waschbetonoberflächen ist sowohl manuell mittels Neoprenrolle als auch im Spritzverfahren mittels Becherpistole grundsätzlich möglich. Ein signifikanter Einfluß der Kornform der Waschbetonzuschläge auf Auftragsmenge oder Applikationseigenschaften der Beschichtung wurde nicht festgestellt.

In Vorversuchen wurde für die jeweiligen glatten und rauhen Untergründe die Verfahrensweise (z.B. Anzahl der erforderlichen Kreuzgänge bei Spritzapplikation) zur Erzielung der erforderlichen Auftragsmenge in Abhängigkeit von der Rauhtiefe ermittelt.

Es zeigte sich, daß die Einhaltung der in den technischen Merkblätter angegebenen Auftragsmengen der flüssigen Beschichtungsmittel problematisch war. Selbst die vom Hersteller angegebenen Auftragsmengen für glatte Betonoberflächen konnten mit der Rollenapplikation auf keinem der untersuchten Untergründe weder mit 2 noch mit 3 Deckschichten sicher erreicht werden.

Mit der Spritzapplikation gelang die Einhaltung der vorgeschriebenen Auftragsmengen unabhängig von der Anzahl der Deckschichten nur bei OS 4-1 und OS 4-2. OS 4-3 zeigte eine starke Tropfenbildung (s. Abb. 38) und OS 4-4 deutliche Ablaufspuren weit vor Erreichen der vorgeschriebenen Auftragsmengen. Da trotz unterschiedlicher Rauheit der Oberflächen keine signifikanten Unterschiede der applizierbaren Auftragsmengen festzustellen waren, sind die Meßergebnisse für alle Untergründe in der folgenden Tabelle Tab. 22, zusammengefaßt:

Tab. 22: Auftragsmengen des flüssigen Beschichtungsmittels

System	OS-Beschichtung	Anzahl Deckschichten	Auftragsmengen [ml/m ²]		
			Herstellervorgabe	Meßwerte	
				Applikation rollen	Applikation spritzen
1	OS 4-1	2	220 - 400	217	348
		3	330 - 600	280	472
2	OS 4-2	2	250 - 400	217	420
		3	375 - 600	273	580
3	OS 4-3	2	400	221	276
		3	600	299	414
4	OS 4-4	2	330	276	290
		3	500	408	435

Die um den Faktor 1,5 (vgl. Kap. 2.4.1) erforderliche Erhöhung der auf glatte Oberflächen bezogenen Auftragsmengen aufgrund der Rauftiefe der Waschbetonoberfläche, war unabhängig vom Untergrund nicht möglich und konnte weder auf den ausgestrahlten Verbundkörpern noch auf den Grundkörpern erreicht werden.



Abb. 38: Tropfenbildung der OS-Beschichtung bei Spritzapplikation

Die visuelle Begutachtung zeigt, daß die weitgehend fehlstellenfreien Oberflächen der PCC-Spachtel die Ausbildung eines geschlossenen Films der Beschichtung auf der Waschbetonoberfläche ermöglichen. Die vorhandenen Fehlstellen in der Oberfläche der PCC-Mörtel werden jedoch nicht überdeckt.

Grundsätzlich variiert der optische Eindruck der Oberflächenschutzsysteme jedoch stark. Während die fast unsichtbar erscheinenden Systeme 1 und 2 das Erscheinungsbild der Waschbetonoberfläche nahezu unverändert lassen, ist ein starker Einfluß der lasierenden Färbung der Beschichtung OS4-3 festzustellen (vgl. Abb. 39). Die Beschichtung OS 4- 4 erscheint zwar optisch vollkommen farblos, der ausgeprägte Glanz stört jedoch den Gesamteindruck (vgl. Abb. 40).



Abb. 39: Opake Färbung der lasierenden Beschichtung OS 4-3



Abb. 40: Glänzende Oberfläche der Beschichtung OS 4-4

3.4.5.5 Verbundverhalten und Struktur

Die Beurteilung des Verbundverhaltens erfolgte anhand der Ermittlung der Haftzugfestigkeit (s. Kap. 3.2.5.5) und der Anschliffe.

Die Untersuchungsschritte 1 und 2 zeigten, daß der raue Untergrund teilweise keine ebene Auflagefläche für den Stempel ermöglichte und dadurch hohe Klebermengen für eine vollflächige Verklebung des Stempels erforderlich waren. Es wurde daher auf das Ausstrahlen der Probekörper verzichtet und die Untersuchungen an der glatten, bündig abgeriebenen Oberfläche durchgeführt, da die applizierte Schichtdicke keinen Einfluß auf den Verbund zwischen Untergrund und PCC-Mörtel/ -Spachtel hat.

Die Abbildung, Abb. 41, zeigt die Mittelwerte der Haftzugfestigkeit und die Beurteilung des Bruchbildes, die Zahlenwerte finden sich im Anhang in Tab. 30 und Tab. 31, Seite 116.

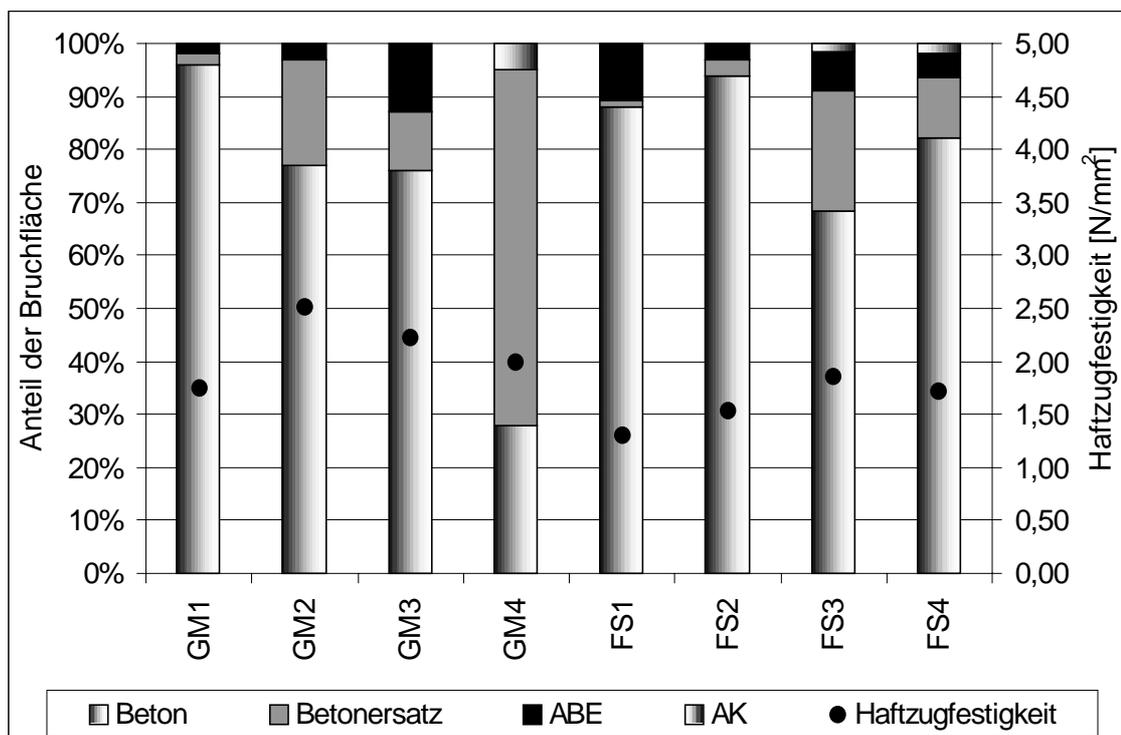


Abb. 41: Haftzugfestigkeit und Bruchbild von PCC-Mörteln /-Spachteln

Grundsätzlich ist ein guter Verbund zwischen dem Waschbetonuntergrund und den aufgetragenen PCC-Mörteln /-Spachteln festzustellen. Die Haftzugfestigkeit der Grobmörtel liegt im Mittel bei $2,1 \text{ N/mm}^2$, die der Feinspachtel bei $1,6 \text{ N/mm}^2$. Die Anforderung der Regelwerke an die Haftzugfestigkeit mit $1,5 \text{ N/mm}^2$ im Mittel und kleinsten Einzelwerten $\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$ werden von den PCC-Mörteln sicher eingehalten, von den PCC-Spachteln knapp verfehlt.

Ein signifikanter Einfluß der Rauhtiefe oder der Kornform der Waschbetonoberfläche auf die Haftzugfestigkeit konnte nicht festgestellt werden.

Entscheidend ist, daß das Bruchversagen überwiegend im Beton erfolgt, d.h. daß der Verbund zwischen Waschbeton und PCC-Mörtel/-Spachtel höher ist als die Zugfestigkeit des Waschbetonuntergrundes und ein Verbundversagen zwischen Untergrund und Betonersatz in der Praxis daher nicht zu erwarten ist.

Die Herstellung der Anschliffe erfolgte wie in Kapitel 3.3.4.6 beschrieben. Die Strukturuntersuchungen zeigten, daß die PCC-Spachtel das weitestgehend fehlerstellenfreie Ausfüllen auch schmaler Zwischenräume zwischen den Waschbetonzuschlägen ermöglichten und keine strukturelle Schwächen in Form von Rissen, Poren oder unausgefüllten Zwickeln auftraten. Die Anschliffe der PCC-Mörtel wiesen eine Vielzahl von Fehlerstellen auf, da das Ausfüllen von Zwickeln und Spalten ≤ 2 mm aufgrund des Größtkorns von ≥ 2 mm nicht möglich ist.

3.4.5.6 Schutzwirkung der Oberflächenschutzsysteme

3.4.5.6.1 Karbonatisierung

Aufgrund der Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen (vgl. Kap. 3.3.4.7.1) sollte auch unter Laborbedingungen untersucht werden, ob durch die parallele Ermittlung der Karbonatisierungstiefe an B 35-Prismen, PCC-Spachtelprismen, Waschbeton-Grundkörpern und Waschbetonverbundkörpern eine qualitative Aussage über Funktionsfähigkeit und Schutzwirkung der Oberflächenschutzsysteme möglich ist.

Die Waschbetongrundkörper wurden von der Herstellung bis zum Beschichtungstermin mit PCC-Mörtel/-Spachtel unter Wasser gelagert. Unmittelbar nach Abschluß der Beschichtungsarbeiten wurden die Grund- und Verbundkörper in Streifen gesägt und nach der Trocknung allseitig, mit Ausnahme der Waschbetonoberfläche, mit Paraffin abgedichtet, damit das Kohlendioxid nur durch die Waschbetonoberfläche eindringt. Danach wurden die so vorbehandelten Proben, sowie die B 35-Prismen und die PCC-Spachtelprismen gleichzeitig in einer Prüfkammer nach DIN 50 017 eingelagert.

Um den zeitlichen Rahmen zu verkürzen, wurde der Karbonatisierungsfortschritt beschleunigt, indem die Proben anfangs einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration von 3 %, später von 30 % gegenüber der normalen Konzentration der Luft von 0,03 % ausgesetzt wurden. In der Prüfkammer mit einem Volumen von 300 l wurde in der ersten Meßserie ein Gasgemisch, bestehend aus 97 % synthetischer Luft und 3 % Kohlendioxid, in der zweiten Meßserie aus 70 % synthetischer Luft und 30 % Kohlendioxid, jeweils mit einer Durchflußmenge von 100 ml/min eingeleitet. Zusätzlich wurde über einer gesättigten Natriumchlorid-Lösung eine konstante Luftfeuchte von 75 % eingestellt, die Temperatur betrug 20 ± 3 °C.

Die Ermittlung der Karbonatisierungstiefe erfolgte analog der in Kapitel 3.3.4.7.1 beschriebenen Verfahrensweise. An den Waschbetonverbund- und Grundkörpern gestaltete sich die Messung der Karbonatisierungstiefe aufgrund der Zuschläge in der Waschbetonoberfläche vergleichsweise schwierig, da die Karbonatisierung an den Grenzen der Zuschläge weit in den Probekörper vorgedrungen war.

Die Ergebnisse sind im Anhang, Tab. 32, Tab. 33, Tab. 34 und Tab. 35 auf Seite 117 bis 118 dargestellt.

Da das Karbonatisierungsverhalten von Beton hinlänglich bekannt und erforscht ist, sollte die Ermittlung des Karbonatisierungskoeffizienten der B 35-Prismen zur Beurteilung der Zeitrafferfunktion der erhöhten Kohlendioxidkonzentration herangezogen werden, um den Vergleich der verschiedenen Meßserien untereinander und gegenüber atmosphärischen Bedingungen zu ermöglichen.

Zur Übertragung der Ergebnisse der Lagerung in der Klimakammer auf atmosphärische Bedingungen ist die Ermittlung des Karbonatisierungskoeffizienten c erforderlich. Für einen Beton der Festigkeitsklasse B 35 kann unter normalen atmosphärischen Bedingungen ein Karbonatisierungskoeffizient $c = 1,8 \text{ mm/a}^{1/2}$ angenommen werden (vgl. Abb. 4). Die Karbonatisierungstiefe der in der Klimakammer gelagerten B 35-Prismen betrug im Mittel 1,4 mm bei 3 %iger CO_2 -Konzentration und 4,5 mm i.M. bei 30 %iger CO_2 -Konzentration. Unter Anwendung des \sqrt{t} -Gesetzes (vgl. Kap. 2.2) werden diese Werte unter normalen atmosphärischen Bedingungen nach 0,6 a bzw. 6,25 a erreicht. Näherungsweise ist daher die Karbonatisierung unter den gewählten Bedingungen in der Klimakammer bei 3 %iger CO_2 -Konzentration um den Faktor 4 und bei 30 %iger CO_2 -Konzentration um den Faktor 40 beschleunigt worden.

Die vorliegenden Ergebnisse der Verbundkörper mit Karbonatisierungstiefen von 1,8 bzw. 5,4 mm im Mittel nach rechnerisch 0,6 bzw. 6,25 a zeigen, daß die aufgebrachten Oberflächenschutzsysteme auch unter Laborbedingungen keinen vollständigen Schutz vor Karbonatisierung sicherstellen konnten. Für die Ursachenklärung sind daher auch in diesem Untersuchungsschritt die nachfolgenden Messungen der Schichtdicken unverzichtbar.

3.4.5.6.2 Bestimmung der Schichtdicken von OS-Beschichtungen

Die vorangegangenen Laboruntersuchungen zur Schutzwirkung der Oberflächenschutzbeschichtungen zeigten, daß kein ausreichender Widerstand gegen Kohlendioxid diffusion gewährleistet ist. Aufgrund des engen Zusammenhanges zwischen Schichtdicke und CO₂-Diffusionswiderstand (vgl. Kap. 2.4) muß die Ursache dafür in der Ausführungsqualität, d.h. in der erzielten Schichtdicke, gesehen werden.

Die Bestimmung der Schichtdicken erfolgte durch mikroskopische Messung anhand von polierten Anschliffen (vgl. Kap. 2.4.2). Wegen der z.T. geringen Schichtdicken wurde beim Ausmessen die Vergrößerung auf bis zu 200fach gesteigert, wodurch eine Ablesegenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ möglich war. Fehlstellen in den Beschichtungen waren lokal begrenzt. Hier lagen auf max. 3 mm Meßlänge Schichtdickenmeßwerte von 0 μm vor.

Von jeder der entsprechend Kap. 3.4.4 hergestellten Probekörper mit den Beschichtungsuntergründen

- Waschbetongrundkörper (Kies/Splitt)
- Waschbetonverbundkörper (Kies/Splitt) mit ausgestrahltem PCC-Spachtel
- Waschbetonverbundkörper (Kies/Splitt) mit nicht ausgestrahltem, bündig abgeriebenen PCC-Spachtel
- Faserzementplatten

wurden vier Anschliffe mit einer Länge der auswertbaren Beschichtungsstrecke von ca. 50 mm hergestellt. Bei einem Meßabstand von 1 mm standen als Stichprobe für die statistische Auswertung jeweils ca. 200 Einzelwerte pro Meßreihe zur Verfügung.

Die folgenden Abbildungen zeigen zunächst Ausschnitte aus den hergestellten Anschliffen und geben einen Eindruck von der Oberflächenstruktur der hergestellten Probekörper. Der Ausschnitt eines Grundkörpers mit gebrochenem Kies als Oberflächenschlag in Abb. 42 zeigt beispielhaft die zwingende Notwendigkeit einer Egalisierung der Oberfläche durch PCC-Spachtel, da derartige Spalten und Zwickel auch bei sorgfältigster Applikation nicht von der OS-Beschichtung überdeckt und im Inneren erreicht werden können.

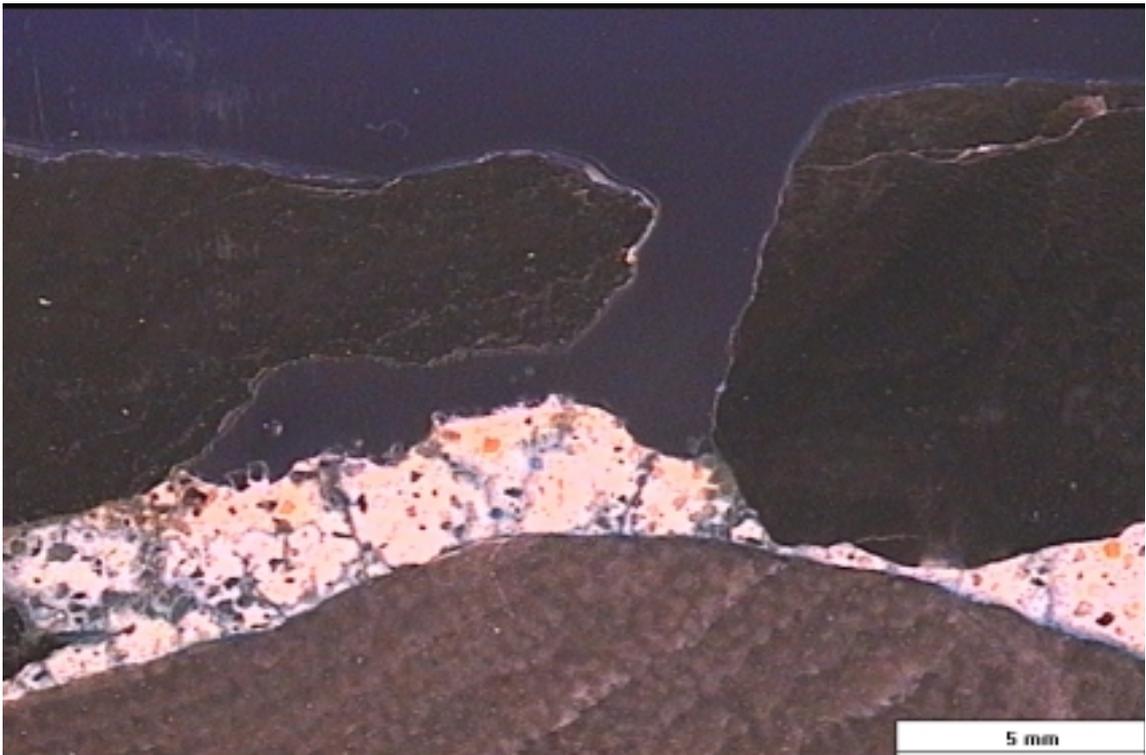


Abb. 42: Nicht überdeckter Spalt eines beschichteten Waschbetongrundkörpers

Den Einfluß des Untergrundes auf die Schichtdicke und damit auch auf die zu erzielende Schutzwirkung verdeutlicht Abb. 43. Selbst kleinste Spitzen auf der vergleichsweise glatten PCC-Spachteloberfläche führen trotz praxisüblichen Materialauftrags zu deutlichen Reduzierungen, weil Schichtdicke und Rauheit von etwa gleicher Größenordnung sind.



Abb. 43: Bündig gespachtelter Waschbetonverbundkörper mit OS-Beschichtung

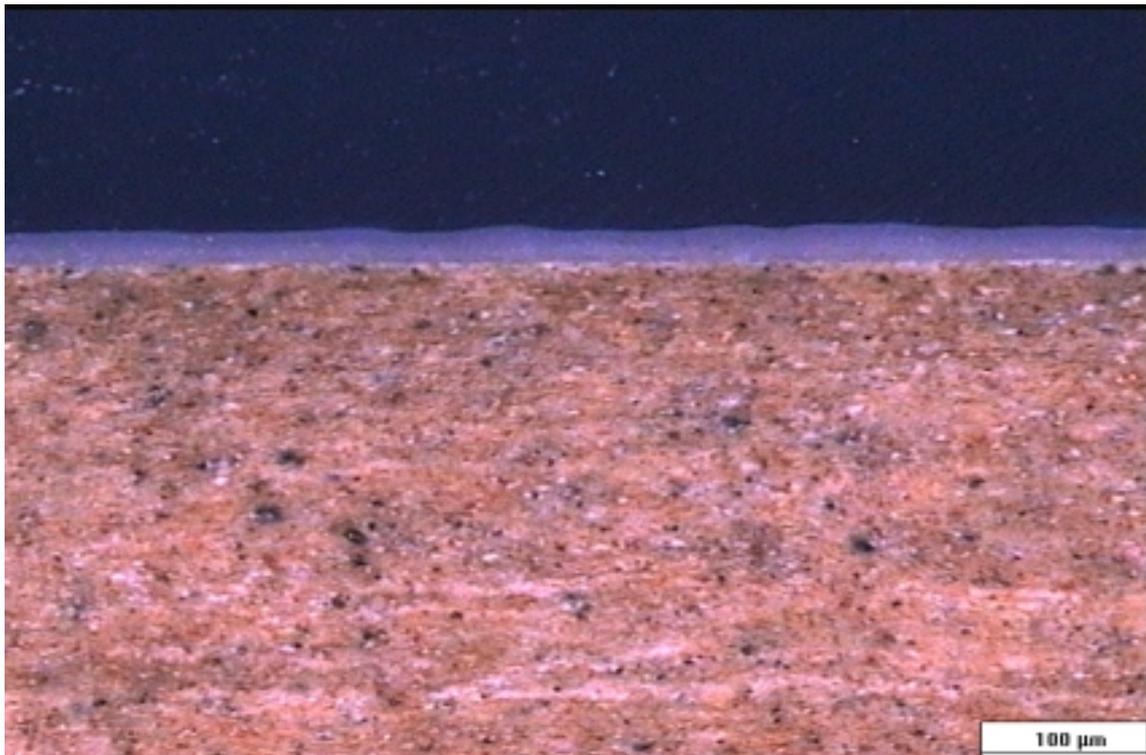


Abb. 44: Beschichtete Faserzementplatte

Abb. 44 zeigt dagegen, daß auf einem nahezu ideal ebenen Untergrund einer Faserzementplatte die Ausbildung eines geschlossenen Films gleichmäßiger Dicke unproblematisch ist, da hier die Rauheit der Oberfläche klein im Vergleich zur Schichtdicke ist.

Für die Bewertung der Ergebnisse der Schichtdickenmessungen dient als Beurteilungskriterium die systemspezifische Mindestschichtdicke $d_{\min s}$, die gemäß den Vorgaben der Regelwerke /BMV1/, /DAfStb1/ bei den hier eingesetzten OS 4 / OS-C Beschichtungen $\geq 80 \mu\text{m}$ sein muß und maßgeblich für Schutzfunktion und Dauerhaftigkeit von Beschichtungen ist. Die Zusammenfassung der ausgewerteten Messergebnisse findet sich in den Tab. 36, Tab. 37 und Tab. 38 des Anhangs auf den Seiten 119 bis 121. Aus der Auswertung der Messergebnisse lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten:

- Einfluß der Eigenschaften des Beschichtungsstoffes

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluß der rheologischen Eigenschaften des Beschichtungsstoffes auf die Schichtdicke. So weist bei den wässrigen Kunststoffdispersionen die Beschichtung OS 4-3 im Vergleich die höchste Dichte und den höchsten Festkörpergehalt auf, woraus dann eine höhere Viskosität und ein geringeres Verlaufsvermögen (vgl. auch Kap. 2.4.1 und Abb. 38) resultieren.

Auch aufgrund des Eigenschaftsprofils ermöglichte diese OS-Beschichtung bei der Rollenapplikation systemspezifische Mindestschichtdicken $\geq 80 \mu\text{m}$ auf ausgestrahlten Verbundkörpern und Faserzementplatten. Auch bei der Spritzapplikation gewährleistet nur Beschichtung OS 4-3 auf allen Untergründen, sogar auf Grundkörpern, eine systemspezifische Mindestschichtdicke $\geq 80 \mu\text{m}$.

Demgegenüber konnte mit der lösemittelhaltigen Acrylharzbeschichtung OS 4-4, die die geringste Dichte, den niedrigsten Festkörpergehalt und somit eine vergleichsweise niedrige Viskosität aufweist, unabhängig vom Applikationsverfahren auf keinem der untersuchten Untergründe ein geschlossener, fehlerfreier Film mit der erforderlichen systemspezifischen Mindestschichtdicke erreicht werden.

- Einfluß des Applikationsverfahrens

Anhand der Meßergebnisse ist ein deutlicher Einfluß des Applikationsverfahrens auf das Schichtdickenergebnis erkennbar. Die Applikation im Spritzverfahren ermöglichte i.d.R. höhere Auftragsmengen des flüssigen Beschichtungstoffes, was auf allen Untergründen zur Erzielung höherer Schichtdicken, gegenüber der Applikation mit der Rolle führte. Die Anforderung an die systemspezifische Mindestschichtdicke wurde jedoch trotzdem nicht auf allen Untergründen sicher erreicht. Der Einfluß des Applikationsverfahrens ist in Abb. 45 am Beispiel der ausgestrahlten PCC-Spachteloberfläche dargestellt.

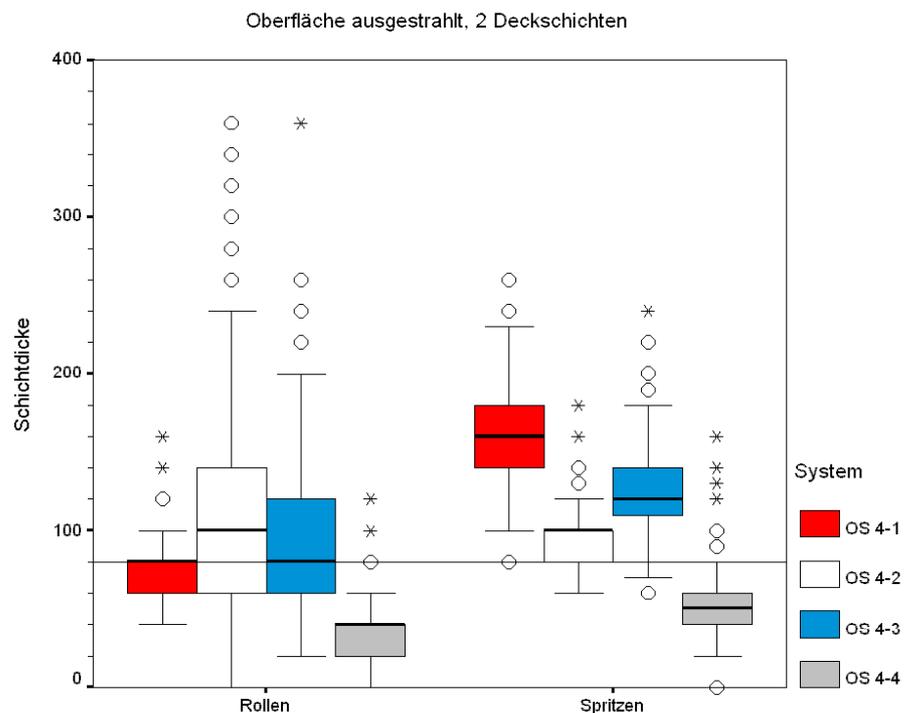


Abb. 45: Einfluß des Applikationsverfahrens auf die Schichtdicke der Beschichtung

Eine eindeutige Korrelation der systemspezifischen Mindestschichtdicke mit den Auftragsmengen des flüssigen Beschichtungstoffes ist nicht festzustellen. So wurde z.B. bei der Spritzapplikation des Systems OS 4-2 auf ausgestrahlten Oberflächen trotz geringer Überschreitung der Vorgaben der Auftragsmengen für glatte Oberflächen die systemspezifische Mindestschichtdicke von $\geq 80 \mu\text{m}$ nicht erreicht. System OS 4-3 erfüllt hier die Anforderung trotz Unterschreitung der Auftragsmenge der technischen Merkblätter.

Anhand der vorliegenden Untersuchungen war kein signifikanter Zusammenhang zwischen Applikationsverfahren und Gleichmäßigkeit der Beschichtung festzustellen.

- Einfluß der Deckschichtenanzahl der Beschichtung

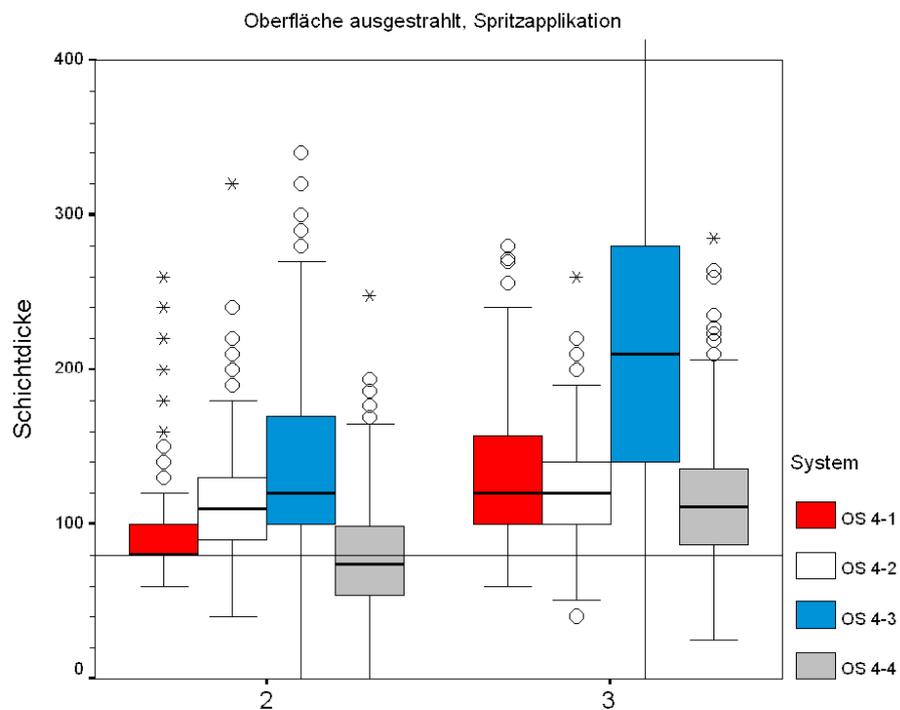


Abb. 46: Einfluß der Deckschichtenanzahl auf die Schichtdicke der Beschichtung

Wie Abb. 46 stellvertretend zeigt, erhöht die Applikation einer zusätzlichen Deckschicht zwar insgesamt die mittlere Schichtdicke der Beschichtung, führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der systemspezifischen Mindestschichtdicke. Dieser Zusammenhang gilt sowohl auf den ausgestrahlten PCC-Spachteloberflächen, den Grundkörpern und auch auf den vergleichsweise glatten, bündig gespachtelten Oberflächen. Die dritte Deckschicht verursacht sowohl auf den ausgestrahlten PCC-Spachteloberflächen, den Grundkörpern und auch auf den vergleichsweise glatten, bündig gespachtelten Oberflächen überwiegend eine deutliche Erhöhung der Streuung, was an der Länge der Box und der Federbalken sehr gut verdeutlicht wird.

Da sich die systemspezifischen Mindestschichtdicke d_{mins} bei Berechnung auf Basis der Normalverteilung aus der Differenz von Mittelwert und der 1,64fachen Standardabweichung s_{sa} ergibt (vgl. Abb. 11 in Kap. 2.4.3) folgt aus der Erhöhung der mittleren Schichtdicke nicht zwangsläufig eine Erhöhung von d_{mins} , wenn durch die weitere Deckschicht die Standardabweichung (Streuung) ansteigt.

- Einfluß des Untergrundes

Ein signifikanter Einfluß der Kornform des Waschbetonzuschlages auf die Schichtdicke der Beschichtung ist nicht festzustellen. Die jeweiligen Ergebnisse für Kies- und Splittuntergrund wurden daher bei allen Datensätzen zusammengefaßt.

Die Rauhtiefe des Untergrundes beeinflusst jedoch sowohl die Gleichmäßigkeit als auch die Schichtdicke der Beschichtung in besonderem Maße. Vor allem auf den rauhen Untergründen variiert die Gleichmäßigkeit der Beschichtungen durch Schichtdickenmaxima in den Zwischenräumen und Minima auf den Zuschlagsspitzen. Als Maß zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit dient die Standardabweichung, die anhand der Länge der Federbalken der Boxplots in den folgenden Abbildungen sehr gut deutlich wird. Beispielhaft ist der Einfluß der verschiedenen Untergründe auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung für die Applikation im Spritzverfahren in den folgenden Abbildungen dargestellt.

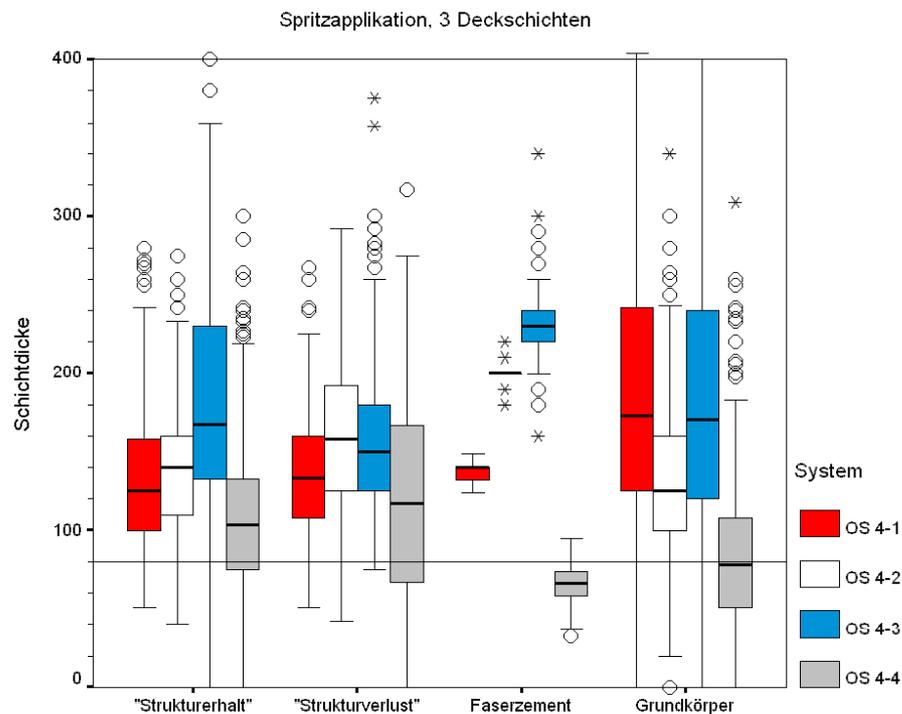


Abb. 47: Einfluß des Untergrundes auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit

Erwartungsgemäß weisen die Beschichtungen auf den vergleichsweise ebenen Faserzementplatten eine hohe Gleichmäßigkeit gegenüber den rauhen Untergründen auf. Verblüffend ist jedoch, daß kein wesentlicher Unterschied in der Gleichmäßigkeit auf den Grundkörpern und den ausgestrahlten Verbundkörpern gegenüber den nicht ausgestrahlten, bündig gespachtelten Verbundkörpern festzustellen ist (vgl. Abb. 47). Auf diesem ebenen Untergrund, dessen Struktur den üblichen Normalbetonoberflächen entspricht, ist der Auftrag von Beschichtungen völlig unproblematisch, so daß keine großen Streuung in der Schichtdicke zu erwarten wäre.

Die Abbildungen lassen den Schluß zu, daß eine "Mikrorauheit" wie z.B. bei den Faserzementplatten, deren Rauhtiefe kleiner als die mittlere Schichtdicke ist ($R_t < d$), Schichtdicke und Gleichmäßigkeit der Beschichtung signifikant positiv beeinflusst. Die zunehmende "Makrorauheit" ($R_t > d$) der bündig gespachtelten und der ausgestrahlten Verbundkörper sowie der Grundkörper übt insgesamt einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Beschichtung aus. Mit sinkender Rauhtiefe ist zwar ein zunehmend positiver Einfluß auf die Dicke der Beschichtung festzustellen, der aber vergleichsweise gering ist. Die Ausbildung geschlossener, fehlerstellenfreier Filme wird jedoch positiv beeinflusst, mit sinkender Rauhtiefe nimmt auch die Anzahl der Fehlerstellen der Beschichtung stark ab (vgl. auch Tab. 36, Tab. 37 und Tab. 38).

4 STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN

Das für Schutzfunktion und Dauerhaftigkeit einer Beschichtung entscheidende Beurteilungskriterium der Regelwerke (vgl. Tab. 1 und Tab. 2) ist die systemspezifische Mindestschichtdicke, die definitionsgemäß der 5 % Fraktile entspricht. Als Voraussetzung zur Beurteilung wird sowohl in den Regelwerken /BMV1/, /DAfStb1/, als auch in der Literatur /Eng1/ die Normalverteilung der Daten nach der Gauß'schen Glockenkurve zugrunde gelegt.

Die Untersuchungen an Bauwerksoberflächen (s. Kap. 3.3.4.7.1) gaben bereits erste Hinweise, daß sich die Verteilung der Meßwerte nicht ohne weiteres mit der Gauß'schen Normalverteilung beschreiben läßt. Beispielhaft dafür ist die Schichtdickenverteilung der Abbildung, Abb. 48, in der die absolute Häufigkeit der Schichtdicken als Balkendiagramm der Gauß'schen Normalverteilung als Liniendiagramm gegenübergestellt ist. Auffällig ist neben der großen Streuung der Meßwerte, daß es sich um eine unsymmetrische Verteilung handelt, die nicht der Normalverteilung folgt.

Ursache der bei einem großen Teil der Meßreihen feststellbaren Unsymmetrie ist die Nähe zum Ursprung durch die relativ geringe Schichtdicke der OS-C / OS 4 Beschichtungen sowie die daraus resultierende nahezu einseitige Streuung durch das Fehlen von Werten unterhalb des Kleinstwerts von 0 µm.

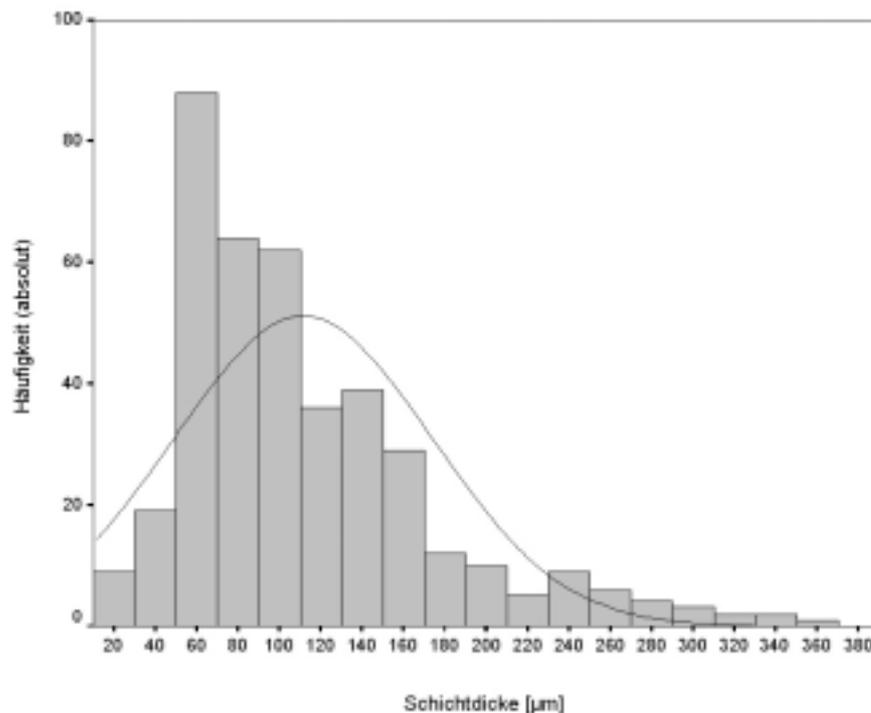


Abb. 48: Typisches Histogramm einer OS 4 / OS-C Beschichtung

Wenn diese bisher bei der Güte- und Ausführungsüberwachung von OS-Beschichtungen angewandte Voraussetzung einer normalverteilten Grundgesamtheit nicht zutrifft, ließe das die Annahme zu, daß die ermittelten Ergebnisse nicht die tatsächlichen Verhältnisse widerspiegeln. Um Fehleinschätzungen sicher ausschließen zu können, ist es daher dringend erforderlich, vor der statistischen Auswertung von Schichtdickenmessungen zu klären, welche Verteilung dafür zugrunde gelegt werden kann bzw. darf. Interessant dabei ist die zusätzliche Klärung der Frage, inwieweit sich eine auf der Annahme "Normalverteilung" getroffene Beurteilung von der auf der zutreffenden Verteilung basierenden Bewertung unterscheidet.

Das gesamte Datenmaterial der hier vorliegenden Schichtdickenmessungen an über 500 Proben mit mehr als 25.000 Einzelwerten wurde daher einer Analyse durch das Statistikprogramm SPSS unterzogen, mit dem die jeweils zutreffende Verteilung ermittelt werden kann.

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, daß sich nur ca. die Hälfte der Datensätze der Schichtdickenmessungen einer mathematisch definierten Verteilung, hier insbesondere den rechtsschiefen Lognormal- und Gammaverteilungen und auch der Normalverteilung zuordnen läßt. Auf die andere Hälfte der Datensätze, die statistisch als "nicht parametrische" Verteilungen bezeichnet werden, läßt sich jedoch keine mathematische Verteilung anwenden.

Die folgende Grafik zeigt, wieviel Prozent der hier vorliegenden Datensätze den jeweiligen Verteilungen zugeordnet werden konnten:

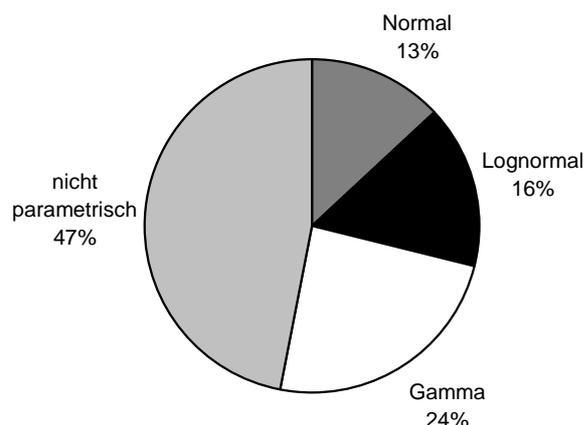


Abb. 49: Zuordnung der Schichtdicken-Datensätze zu den verschiedenen Verteilungen

Aufgrund der statistisch anspruchsvollen und sehr aufwendigen Ermittlung von Verteilungsart und zugehöriger systemspezifischer Mindestschichtdicke wurde geprüft, ob die Berechnung zwingend erforderlich ist oder möglicherweise die prinzipiell fragliche Zugrundelegung einer Normalverteilung doch Werte ergibt, die unter baupraktischen Gesichtspunkten gesicherte Aussagen liefern. Anhand der vorgenannten Berechnungsverfahren wurde daher bei allen Bewertungen die Berechnung der systemspezifischen Mindestschichtdicke auf Basis der tatsächlichen Verteilung ($d_{\min s}$ - Vert.) und auf Basis der Normalverteilung ($d_{\min s}$ - Normal) gegenübergestellt und in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tab. 23: Gegenüberstellung $d_{\min s}$ -Vert. zu $d_{\min s}$ - Normal

Verhältnis $d_{\min s}$ -Vert. zu $d_{\min s}$ -Normal		Anzahl n der Datensätze	Prozentualer Anteil der Datensätze
$d_{\min s}$ - Vert. > $d_{\min s}$ - Normal	über 100 %	5	8
	bis 100%	12	12
	bis 25%	35	53
$d_{\min s}$ - Vert. = $d_{\min s}$ - Normal	0%	3	5
$d_{\min s}$ - Vert. < $d_{\min s}$ - Normal	bis 25%	6	9
	bis 100%	2	3
	über 100%	3	4

Die Ergebnisse aller Datensätze sind im Anhang in Tab. 36, Tab. 37 und Tab. 38 auf den Seiten 119 bis 121 dargestellt.

Der Vergleich der systemspezifischen Mindestschichtdicke $d_{\min s}$ - Vert. und $d_{\min s}$ - Norm. zeigt folgende Sachverhalte:

- Bei 78 % der Datensätze ist $d_{\min s}$ - Vert. \geq $d_{\min s}$ - Norm., d.h. die praxisübliche Bewertung auf Basis der Normalverteilung liegt in der Regel auf der "sicheren" Seite.
- Der "Sicherheitsabstand" von $d_{\min s}$ - Norm. gegenüber dem tatsächlichen $d_{\min s}$ - Vert kann Werte bis zu mehreren 100 % bezogen auf $d_{\min s}$ - Norm. betragen, liegt aber bei mehr als der Hälfte der Datensätze bei \leq 25 %.

Gründe für eine Anwendung der Verteilungsanalyse von Datensätzen der Schichtdickenmessung zur Ermittlung der tatsächlich vorliegenden systemspezifischen Mindestschichtdicke $d_{\min s}$ - Vert. liegen in folgenden Sachverhalten:

- a) Die Anforderung der Regelwerke an $d_{\min s}$ wurden im Rahmen der Gütekontrolle bei der üblichen Zugrundelegung der Normalverteilung unterschritten.
- b) Ein zu großer "Sicherheitsabstand" der ermittelten $d_{\min s}$ - Norm. zur tatsächlichen $d_{\min s}$ - Vert. ist unwirtschaftlich.
- c) Es kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, daß $d_{\min s}$ - Vert. größer als $d_{\min s}$ - Norm. ist, da bei 16 % der untersuchten Datensätze $d_{\min s}$ - Vert. < $d_{\min s}$ - Norm ist.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, daß bei der Auswertung der statistischen Analyse auch der Frage nachgegangen wurde, ob die gefundenen Ergebnisse jeweils auffällig mit den eingesetzten Werkstoffen, der Applikation oder dem Untergrund korrelieren. Es ist ja von vornherein nicht von der Hand zu weisen, daß ein Vorliegen einer bestimmten Verteilung beispielsweise vom jeweiligen Untergrund abhängt. Derartige Zusammenhänge konnten im Rahmen aller hier vorliegenden Beschichtungsdaten jedoch nicht gefunden werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

5.1 SCHUTZ UND INSTANDSETZUNG VON WASCHBETON

Betonoberflächen lassen sich vielfältig sowohl durch Art und Strukturierung des Schalungsmaterials als auch durch nachträgliche Bearbeitung der erhärteten Oberfläche gestalten. Aufgrund der einfachen und wirtschaftlichen Herstellung im Fertigteilwerk sowie der Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten ist das Auswaschen das am häufigsten angewandte Verfahren zur Bearbeitung von Betonoberflächen.

Auch an Waschbetonbauteilen treten die bekannten Betonoberflächenschäden in Form von Abplatzungen über korrodierenden Bewehrungsstählen auf. Ursache ist wie an Normalbetonoberflächen die Karbonatisierung, die den Bewehrungsstahl aufgrund mangelnder Betonüberdeckung erreicht und so die pH-Wert bedingte Passivierung der Stahloberfläche aufhebt. Die korrosionsbedingte Volumenzunahme der Bewehrungsstähle verursacht dann die bekannten Abplatzschäden der Betonoberfläche.

Vorrangiges Ziel jeder Instandsetzungsmaßnahme ist die Beseitigung vorhandener Schäden und die Gewährleistung eines möglichst dauerhaften Schutzes vor weiteren Schäden. Aufgrund des vergleichsweise niedrigen Erkenntnisstandes und daher noch fehlender Regelwerke waren systematische Untersuchungen zu Schutz und Instandsetzung strukturierter Betonoberflächen erforderlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit geschah dies in drei aufeinanderfolgenden Untersuchungsschritten, die im Labor und am Bauwerk durchgeführt wurden. Im folgenden sind Zielsetzungen und zu deren Klärung durchgeführte Untersuchungen dargestellt:

1. Untersuchung des Einflusses von Kornform und Rauhtiefe der Grundkörper auf Struktur und Verbund der PCC-Mörtel-/Spachtel durch Ermittlung der Haftzugfestigkeit und visuelle Begutachtung von Anschliffen
2. Feststellung der Eignung von PCC-Mörteln und PCC-Spachteln durch Beurteilung der Verarbeitbarkeit, deren Struktur und Verbund sowie durch Ermittlung der Ausstrahlzeit
3. Untersuchung der Schutzwirkung von Oberflächenschutzsystemen durch Ermittlung des Karbonatisierungsverhaltens und Messung der Schichtdicken der Beschichtung
4. Ermittlung des Einflusses des Untergrundes (Kornform und Rauhtiefe), der Eigenschaften, Auftragsmenge und Anzahl der Deckschichten sowie des Applikationsverfahrens der Beschichtung auf deren Schichtdicke und Gleichmäßigkeit durch Messung und Auswertung von Schichtdicken

5. Anwendung und Auswahl statistischer Auswerteverfahren auf die Ergebnisse der Schichtdickenmessungen sowie Auswahl geeigneter Darstellungsformen

Die durchgeführten Untersuchungen ermöglichten Erkenntnisse zu geeigneten Verfahrensweisen und Werkstoffen, deren jeweiligen optischen Erscheinungsbildern und Witterungsbeständigkeit. Bezüglich der verwendeten Werkstoffe lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

a) Elastische Schlämme

Die Applikation der elastischen Schlämmen war unproblematisch, während der Erhärtung zeigte sich jedoch eine ausgeprägte Rißbildung, da die vorgeschriebene Schichtdicke aufgrund der Rauhtiefe der Waschbetongrundkörper zwangsläufig nicht eingehalten werden konnte.

b) PCC-Spachtel

Die manuelle Applikation war unproblematisch und die erhärteten Oberflächen zeigten sich fehlerstellen- und rißfrei. Bei der Spritzapplikation war die Steuerung der Schichtdicke und das Ausfüllen von Zwickeln und Spalten zwischen den Waschbetonzuschlägen schwierig. Die Verbund- und Strukturuntersuchungen gaben keine Hinweise auf Verbundprobleme zwischen Untergrund und Instandsetzungssystem. Das Freilegen der Waschbetonstruktur mittels Strahlverfahren mit festem Strahlgut war einfach und zeitlich flexibel durchzuführen sowie gut steuerbar.

c) PCC-Mörtel

Bei der manuellen Applikation war ein erhöhter Kraftaufwand festzustellen, der jedoch kein technisches Problem darstellte. Das Ausfüllen von Zwickeln und Spalten war durch das Größtkorn weder bei der manuellen noch bei der Spritzapplikation gewährleistet. Ein negativer Einfluß auf das insgesamt gute Verbundverhalten zwischen PCC-Mörtel und Waschbeton trat jedoch nicht auf. Das Zeitfenster, in dem wirtschaftlich vertretbare Ausstrahlzeiten möglich sind, mußte jeweils erst ermittelt werden und war vergleichsweise klein. Aufgrund der Freilegung der Grobzuschläge entspricht der optische Eindruck der ausstrahlten Oberfläche nicht dem ursprünglichen Zustand.

d) Oberflächenschutzbeschichtungen

Die Applikation der Beschichtungen ist sowohl manuell als auch im Spritzverfahren grundsätzlich möglich, wobei das Auftragen der erforderlichen Auftragsmengen der flüssigen Beschichtungsstoffe entsprechend der Rauhtiefe des Untergrundes nicht möglich war. Bei der visuellen Begutachtung beeinflusste eine opake Färbung bzw. ein hoher Glanzgrad das Erscheinungsbild von zwei Beschichtungen negativ.

Messungen des Karbonatisierungsfortschritts am Untergrund zeigten keinen ausreichenden Kohlendioxid-Diffusionswiderstand der OS-Beschichtungen. Die zur Ursachenklärung durchgeführten Schichtdickenmessungen zeigten einen Einfluß der rheologischen Eigenschaften, des Applikationsverfahrens, der Deckschichtenanzahl und der Rauheit des Untergrundes auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit der OS-Beschichtungen. Mit der Rollenapplikation war die Erzielung der systemspezifischen Mindestschichtdicke $\geq 80 \mu\text{m}$ vereinzelt auf Faserzementplatten und ausgestrahlten Verbundkörpern möglich. Die Spritzapplikation ermöglichte $d_{\text{min s}} \geq 80 \mu\text{m}$ vereinzelt auf ausgestrahlten Verbundkörpern sowie auf allen bündig gespachtelten Verbundkörpern und Faserzementplatten. Eine OS-Beschichtung erreichte die systemspezifische Mindestschichtdicke auf allen untersuchten Untergründen.

Für die drei Instandsetzungsvarianten ließen sich aus den vorgenannten Ergebnissen folgende Schlüsse ziehen:

- Variante I "Elastische Schlämme"

Da bereits in den Voruntersuchungen bei der vergleichsweise geringen Rauhtiefe der Waschbetongrundkörper eine ausgeprägte Reißbildung bei der Erhärtung der Schlämme festzustellen war, wurde diese Variante nicht weiter verfolgt, da die Anwendung auf den i.d.R. deutlich höheren Rauhtiefen von Waschbetonoberflächen in der Praxis nicht erfolgversprechend scheint.

- Variante II "Strukturerhalt"

Die praktische Umsetzung der Ergebnisse der Voruntersuchungen auf reale Bauwerksflächen sowie die vertiefenden Laboruntersuchungen zeigten, daß die Ausführung auf Waschbeton unter Verwendung von PCC-Spachtel und OS 4 / OS-C Beschichtungen bei Anwendung entsprechender Sorgfalt sowohl einen weitestgehenden Erhalt bzw. die Wiederherstellung der ursprünglichen Oberflächenstruktur als auch einen dauerhaften Schutz ermöglicht.

- Variante III "Strukturverlust"

Die der klassischen Betoninstandsetzung der Regelwerke entsprechende Applikation von PCC-Mörteln bündig mit den Zuschlagsspitzen, Egalisierung der Oberfläche durch PCC-Spachtel und Applikation einer farbigen Beschichtung (OS-D II / OS 5), gewährleistet die dauerhafte Instandsetzung unter völligem Verlust der Oberflächenstruktur. Ob die aufgebrauchte Last ggf. statisch ein Problem darstellt ist im Einzelfall an Probeflächen zu untersuchen.

Eine abschließende Konsequenz aus der Vielzahl vergleichender Untersuchungen zur Applikation von OS-Beschichtungen sind berechtigte Zweifel an der unbedingt erforderlichen, sicheren Gewährleistung von Auftragsmengen und damit der systemspezifischen Mindestschichtdicken in der Praxis. Sowohl auf glatten als auch auf strukturierten Oberflächen fanden sich in Laboruntersuchungen ebenso wie am Bauwerk erhebliche Unterschreitungen gegenüber den Vorgaben der technischen Merkblätter bzw. der Regelwerke. Insbesondere die nicht erwarteten Befunde an den glatt abgeriebenen Probekörperoberflächen und den Faserzementplatten waren wesentlicher Anlaß für diese Feststellung.

Die hohen Anforderungen der Regelwerke gewährleisteten die Dauerhaftigkeit und den Schutz von Instandsetzungsmaßnahmen glatter Betonoberflächen aufgrund langjähriger praktischer Erfahrungen erfolgreich. Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit kann davon ausgegangen werden, daß auch Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen unter Erhalt bzw. Wiederherstellung der ursprünglichen Oberflächenstruktur mit den hier ermittelten Werkstoffen und Verfahrensweisen unter Anwendung der erforderlichen Sorgfalt vergleichbar zuverlässig möglich ist.

5.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG VON SCHICHTDICKENMESSUNGEN

Ziel dieser Untersuchungen war der Nachweis statistischer Merkmale sowie die Überprüfung vorhandener Bewertungskriterien zur Klärung der Frage, wie der sichere Nachweis der geforderten Schutzwirkung auf Basis der Vorgaben der Regelwerke anhand der Beurteilung der systemspezifischen Mindestschichtdicke zu führen ist.

Basierend auf über 25000 ermittelten Einzelschichtdicken an unterschiedlichen OS-Beschichtungen mit verschiedenen Applikationsverfahren und auf unterschiedlichen Untergründen ergaben sich folgende, wesentliche Ergebnisse:

- Zur vergleichenden Gegenüberstellung einer großen Anzahl von Verteilungen sind Histogramme aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit wenig geeignet. Als vorteilhaft erwies sich dagegen die Darstellung mittels sog. Boxplots, die beim Vergleich von vielen Verteilungen auch die Darstellung statistischer Kennwerte ermöglichen. Sie zeigen auch ganz unmittelbar das Vorliegen von Schiefen, d.h. nicht normalverteilter Grundgesamtheiten.
- Wichtigstes Ergebnis der statistischen Untersuchung war, daß unabhängig vom Untergrund und bei sorgfältigster Applikation die Verteilung der Schichtdickenmeßwerte nach der Gauß'schen Normalverteilung keinesfalls vorausgesetzt werden kann.

Für eine exakte Bewertung der Ausführungsqualität muß daher zunächst die Frage beantwortet werden welcher statistischen Verteilung die Schichtdickenmeßwerte tatsächlich folgen. Diese Analyse ist allerdings anspruchsvoll und aufwendig und daher nicht im Regelfall anwendbar. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten, umfangreichen Analysen führten zu folgenden, wesentlichen Erkenntnissen:

1. Nur ca. die Hälfte aller Meßreihen ließen sich einer mathematisch definierten Verteilung, hier insbesondere der rechtsschiefen Lognormal- und Gammaverteilung sowie der Normalverteilung zuordnen, die andere Hälfte war mathematisch nicht parametrisch verteilt.
2. Durch Verteilungsanalyse und Berechnung der zugehörigen systemspezifischen Mindestschichtdicke wurde geprüft, ob möglicherweise die prinzipiell fragliche Zugrundelegung einer Normalverteilung doch Werte ergibt, die unter baupraktischen Gesichtspunkten gesicherte Aussagen liefern. Es zeigte sich, daß bei 78 % der Datensätze $d_{\min s} - \text{Vert.} > d_{\min s} - \text{Norm.}$ ist, d.h. die praxisübliche Bewertung auf Basis der Normalverteilung in der Regel auf der "sicheren" Seite liegt. Dieser Sachverhalt ist aber nicht grundsätzlich gegeben, da bei 16 % der Datensätze $d_{\min s} - \text{Vert.} \leq d_{\min s} - \text{Norm.}$ ist.

3. Die Notwendigkeit der Verteilungsanalyse von Datensätzen der Schichtdickenmessung und Ermittlung der tatsächlich vorliegenden systemspezifischen Mindestschichtdicke $d_{\min s}$ - Vert. kann erforderlich werden, wenn im Rahmen einer Gütekontrolle die Anforderung der Regelwerke an $d_{\min s}$ bei Zugrundelegung der Normalverteilung unterschritten wird. Auch Hinweise auf einen unwirtschaftlich großen "Sicherheitsabstand" der ermittelten $d_{\min s}$ - Norm. zur tatsächlichen $d_{\min s}$ - Vert. kann Anlaß für eine derartige Analyse sein.

5.3 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Aus den durchgeführten Untersuchungen können für dauerhafte Schutz und Instandsetzungsmaßnahmen von Waschbetonoberflächen unter Erhalt bzw. Wiederherstellung der Waschbetonoberfläche folgende Erkenntnisse für die Ausführung in der Praxis abgeleitet werden:

- Eingesetzt werden dürfen nur zugelassene Werkstoffe nach ZTV-SIB oder Rili-SIB.
- Vor jeder Maßnahme muß eine repräsentative Anzahl Probeflächen von mehreren m² Größe angelegt werden, an der die nachfolgend aufgeführten Arbeitsschritte hinsichtlich Vorbehandlung des Untergrundes, Materialverbrauch, Zeitaufwand und zeitlichem Ablauf entsprechend der örtlichen Verhältnisse festgelegt werden können. Wesentlich ist dabei auch die Erkenntnis über den erzielbaren optischen Eindruck der instandgesetzten Oberfläche.

Für die Instandsetzungsvariante "Strukturerhalt" ist folgende Vorgehensweise zu empfehlen:

1. Reinigen des Untergrundes mittels Kaltwasserstrahlen. Nebelsandstrahlen ist i.d.R. nicht erforderlich. Auf die Verwendung einer Haftbrücke sollte verzichtet werden
2. Farbangleichung instandgesetzter Schadstellen, Ausfüllen von Zwickeln, Reduzierung der Rauftiefe und Einbinden loser Zuschläge durch manuelle Applikation von PCC-Spachteln bündig mit den Kieselspitzen unabhängig von der Rauftiefe des Untergrundes
3. Freilegung der Waschbetonstruktur mittels Nebelsandstrahlen nach ≥ 24 h
4. Applikation farbloser oder schwach lasierend eingestellter OS-C/OS 4 Beschichtungen auf Dispersionsbasis bevorzugt im Spritzverfahren und mit einer zusätzlichen Deckschicht. Erhöhung der erforderlichen Auftragsmenge des flüssigen Beschichtungstoffes etwa um den Faktor 1,5 und regelmäßige Kontrolle während der Ausführung durch Wägung von Werkzeugen und Gebinden
5. Regelmäßige Ausführungskontrolle während der Applikation der OS-Beschichtung durch gleichzeitige Beschichtung senkrecht gelagerter Faserzementplatten an denen die Schichtdicken mittels Keilschnittverfahren überprüfbar sind
6. Die Auswertung der Schichtdickenmeßwerte kann entsprechend der Vorgabe der Regelwerke unter ggf. unkorrekter Zugrundelegung einer Normalverteilung der Daten erfolgen. Wird die systemspezifische Mindestschichtdicke unterschritten, kann eine genauere Beurteilung hinsichtlich der erzielten Schichtdicke entsprechend Kap. 5.2 erfolgen

Kann auf den Erhalt der ursprünglichen Oberflächenstruktur verzichtet werden, wird prinzipiell wie vorstehend beschrieben vorgegangen. An die Stelle des Schrittes 3 "Freilegen der Waschbetonstruktur" tritt hier jedoch folgender Arbeitsschritt:

3. Auftrag einer zweiten Lage PCC-Spachtel bis ca. 2 mm über den Kieselspitzen zur Schaffung eines glatten beschichtungsfähigen Untergrundes

Für den Oberflächenschutz können dann auch farbige OS 5 / OS-D II Beschichtungen eingesetzt werden, wobei keine Erhöhung der Auftragsmenge erforderlich ist.

Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, daß für das in der Praxis auch eingesetzte Verfahren, unmittelbar auf die gereinigte Waschbetonoberfläche eine OS 4 / OS-C Beschichtung aufzutragen, keine definierte Schutzwirkung erzielbar ist.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- /Bag1/ Bagda, E., Rißüberbrückende Beschichtungen. Fassadenschutz und Bausanierung. Sindelfingen, expert verlag. 1986.
- /Bak1/ Bakker, R.F.M.; Roessink, G., Zum Einfluß der Karbonatisierung und der Feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Beton-Information. 3-4/1991.
- /Beton1/ Freundliche Gesichter von Betonbauten. Fertigteilbau und Industrialisiertes Bauen. 2/1981.
- /Beton2/ Betonoptik wurde "systematisch" erhalten. Beton. 3/1997.
- /Bie1/ Bielak, E., Bewertung von Ergebnissen der Zement- und Betonprüfung. Beton. 6/1994.
- /Bier1/ Bier, T.A., Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Universität Karlsruhe, Dissertation. 1988
- /BMV1/ Bundesministerium für Verkehr, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Beton. Dortmund, Verkehrsblatt-Verlag. 1987
- /Bri1/ Brinkmann, A., Instandsetzung einer Waschbetonfassade. Bautenschutz und Bausanierung. 7/1991.
- /Bro1/ Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke; P., Lehrbuch der Lacktechnologie. Hannover, Curt R. Vincentz Verlag. 1998
- /Bud1/ Budnik, J.; Dornauer, H., Sichere Grundlage für Beschichtungen. Beton. 12/1993.
- /Bun1/ Bunte, D., Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. Hrsg.: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb Heft 436. Berlin, Beuth-Verlag. 1993
- /Bur1/ Burkert, K.; Gruber, G., Betonoptik vollständig reprofiliert. Bautenschutz und Bausanierung. 8/1996.
- /Cze1/ Czernin, W., Zementchemie für Bauingenieure. Wiesbaden, Bauverlag. 1977
- /DAfStb1/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Köln, Beuth-Verlag. 1990

-
- /Dja1/ Djamous, F.; Marschall, S.; Neisecke, J., Herstellung von Dünnschliffen und polierten Anschliffen aus Beton- und Gesteinsproben. Mitteilungen aus dem IBMB der TU Braunschweig.
- /Dol1/ Dolny, S., Untersuchungen zu Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2000.
- /Eng1/ Engelfried, R., Über den Einfluß der Schichtdicke und der Alterung auf die Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen. Aachen, Shaker Verlag. 2001
- /Feh1/ Fehlhaber, J.M., Farbige Beton-Aspekte. deutsche bauzeitung. 4/1990.
- /Fre1/ Frey, R., Untersuchung der 20jährigen Karbonatisierung von Betonen. Beton. 3/1993.
- /Fun1/ Funk, G.; Reinhardt, H.-W., Realitätsnahe Berechnung der Carbonisierungstiefe unter Berücksichtigung von Materialparametern und Bewitterung. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 3/1997.
- /Ger1/ Gerdes, A.; Wittmann, F.H., Modell zur Vorhersage der Langzeitbeständigkeit von Beton unter Einwirkung betonangreifender Wässer oder Kohlendioxid. Hrsg.: F.H. Wittmann, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3. Esslingen, expert Verlag. 1993
- /Gro1/ Großkurth, K.P.; Konietzko A., Polymermodifizierter zementgebundener Beton als Konstruktionswerkstoff. Bauingenieur. 64. 1989.
- /Gru1/ Grube, H.; Krell, D., Zur Bestimmung der Carbonisierungstiefe von Mörtel und Beton. Beton. 3/1986.
- /Grü1/ Grüneis, H., Betonfertigteile als konstruktive und gestalterische Elemente. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 8/1987.
- /Gru2/ Grube, H.; Kern, E.; Quitmann, H.-D., Instandhaltung von Betonbauwerken. Beton-Kalender. Berlin, Ernst&Sohn. 1990
- /Gud1/ Gudgeon, A.R., Dekorative Oberflächen. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 8/1987.
- /Har1/ Hartung, J., Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. München, Wien, R. Oldenbourg Verlag. 1982
- /Hem1/ Hemp, M., Eignung von PCC-Mörteln zur Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1999.
- /Heu1/ Heufers, H. et al, Neuartige Oberflächengestaltung mit farbigen Zuschlägen. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 4/1980.

-
- /Heu2/ Heufers, H.; Schulze, W., Waschbeton mit weißem Zement. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 1/1984.
- /Iva1/ Ivanyi, G.; Eßer, A., Kunststoffmodifizierter Zementmörtel (PCC) als Ersatz für Betondeckung. Hrsg.: Deutscher Beton-Verein, DBV-Forschungsvorhaben 117.
- /Jun1/ Jungermann, B., Die Betonmikroskopie zur Erläuterung physikalischer Meßgrößen. Hrsg.: F.H. Wittmann, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Esslingen, 1986
- /Ker1/ Kern, E., Korrosionsschutz von Stahl im Beton. VDI-Berichte 285. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1977
- /Kin1/ Kind-Barkauskas, F. et al, BetonAtlas. Düsseldorf, Beton-Verlag. 1995
- /Kle1/ Kleine-Büning, H.; Scheer, O., Herstellung von Dünnschliffen für die automatische Bildanalyse von Betonproben. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 4/1980.
- /Klei1/ Kleinschmidt; H.-J., Untersuchungen über das Fortschreiten der Carbonatisierung an Betonbauwerken, DAfStb Heft 280. Berlin, Beuth-Verlag. 1977
- /Klo1/ Klopfer, H., Bauphysikalische Aspekte der Betonsanierung. Bautenschutz und Bausanierung. 4/1980.
- /Klo2/ Klopfer, H., Imprägnierungen, Anstriche und Beschichtungen für Beton. Zementtaschenbuch 48. Wiesbaden-Berlin, Bauverlag. 1984
- /Klo3/ Klopfer, H., Möglichkeiten eines zusätzlichen Schutzes auf der Betonoberfläche. VDI-Bericht 653, Korrosionsschutz im Ingenieurbau. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1988
- /Knö1/ Knöfel, D., Stichwort Baustoffkorrosion. Wiesbaden, Bauverlag. 1982
- /Knö2/ Knöfel, D., Dauerhafter Beton und Betonkorrosion. deutsche bauzeitung. 4/1986
- /Kor1/ Kordina, K.; Neisecke, J.; Landwehrs, K., Instandsetzen und Schützen von Betonoberflächen mit Anstrichen und kunststoffmodifizierten Mörteln. Forschungsbericht Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. TH Braunschweig, 1986
- /Kot1/ Kotz, S.; Johnson, N.; Read, C., Encyclopedia of statistical science. Canada, John Wiley & Sons Inc.. 1983

-
- /Kro1/ Kropp, J., Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Universität Karlsruhe, Dissertation. 1983
- /Kru1/ Krüger, M., Untersuchung der Eignung von PCC-Mörteln zur Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1998.
- /Kwa1/ Kwasny, R.; Rossen, A.; Maultzsch, M., Vergleichende Untersuchungen an Reparaturmörteln. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 12/1986.
- /Lam1/ Lamprecht, H.-O., Betonoberflächen - Gestaltung und Herstellung. Grafenau, expert Verlag. 1984
- /Les1/ Leßmann, M., Eignung ZTV-SIB geprüfter Instandsetzungssysteme für Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2000.
- /Lin1/ Lindner, W., Prüfen - Planen - Sanieren. Das Deutsche Malerblatt. 12/1990.
- /Lul1/ Luley, H., Hrsg.: Bundesverband der deutschen Zementindustrie, Instandsetzen von Stahlbetonoberflächen. Düsseldorf, Beton-Verlag. 1997
- /Lut1/ Lutz, P.; Jenisch, P.; Klopfer, H., Lehrbuch der Bauphysik. Stuttgart, .G. Teubner. 1985
- /Mey1/ Meyer, A.; Wierig, H.-J.; Husmann, K., Karbonatisierung von Schwerkton, DAfStb Heft 182. Berlin, Beuth-Verlag. 1967.
- /Mic1/ Michel, W., Neuentwicklung für Waschbetonoberflächen. Bausubstanz. 3/1994.
- /Mic2/ Michel, W., Betonoberflächeninstandsetzung Waschbeton. Das deutsche Malerblatt. 4/94.
- /Mic3/ Michel, W., Waschbeton jetzt sicher schützen. Das Maler- und Lackiererhandwerk. 8/1991.
- /Nae1/ Nägele, E. , Dispersionsbaustoffe. Köln, Rudolf Müller. 1989
- /Nei1/ Neisecke, J., Stahlbetoninstandsetzung, Planungs- und Ausführungskonzepte. Bundesbaublatt. 9/1990.
- /Nei2/ Neisecke, J., Karbonatisierung von Stahlbeton - wirklich ein Problem?. Beton-Information. 3-4/1991.
- /Nei3/ Neisecke, J., Erfahrungen bei der Reparatur und dem Schutz von Betonoberflächen. Hrsg.: Witmann, F., Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. 1983

-
- /Nei4/ Neisecke, J., Wirkung und Eignungsnachweis von Betonoberflächen-Schutzbeschichtungen. Hrsg.: Witmann, F., Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. 1986
- /Nis1/ Nischer, P., Einfluß von Umwelt- und Betongüte auf die Karbonatisierung. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 11/1984.
- /Öch1/ Öchsner, W. Ph.; Haasis, J.; Stöckl, F., Das Wesen des Betons und sein Schutz gegen Umwelteinflüsse. Bautenschutz und Bausanierung. Sonderdruck.
- /Öch2/ Öchsner, W. Ph.; Semet, W.; Stöckl, F., Oberflächenschäden an Stahlbeton - Ursachen und Behebung. Bautenschutz und Bausanierung. 3/1980.
- /Pet1/ Petry, Betonwerkstein und künstlerische Behandlung des Betons. Berlin, Deutscher Beton-Verein. 1913
- /Pör1/ Pörschmann, M., Feinwaschen mit Kontaktverzögerern. Betonfertigteile + Betonwerkstein. 6/1985.
- /Rau1/ Raupach, M.; Ortmanns, C., Alte Fassaden schützen: Konservieren von Sichtbeton unter denkmalpflegerischen Aspekten. Bundesbaublatt. 4/2001.
- /Reh1/ Rehm, G., Korrosionsprobleme im Stahlbetonbau. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 2/1977.
- /Reu1/ Reul, H., Außenanstriche auf mineralischen Baustoffen. Fassadenschutz und Bausanierung. Sindelfingen, expert verlag. 1986.
- /Rie1/ Rieche, G.; Ross, H., Beton-Anstriche. deutsche bauzeitung. 4/1986.
- /Rie2/ Rieche, G., Kunststoffe und Beton im Vergleich. VDI-Berichte 384. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1980.
- /Rös1/ Rößler, G., Maßgebende Einflüsse auf das Karbonatisierungsverhalten kunststoffmodifizierter Zementmörtel. Hrsg.: F.H. Wittmann, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3. Esslingen, expert-Verlag. 1993.
- /Ruf1/ Ruffert, G., Betondeckung - Carbonatisierung. Schutz- und Sanierungsmaßnahmen. Bautenschutz und Bausanierung. 2/1980.
- /Sac1/ Sachs, L., Angewandte Statistik. Berlin, Springer Verlag. 1999.
- /Sche1/ Scheer, O., Statistische Auswerteverfahren in der Betontechnologie. Beton-Information. 1+2/1985.

-
- /Sas1/ Sasse, H.R. et al, Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen - Sachstandsbericht. Hrsg. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb Heft 443. Berlin, Beuth-Verlag.1994.
- /Schi1/ Schießl, P., Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Carbonatisierung des Betons. Hrsg.: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb Heft 255. Berlin, Ernst & Sohn. 1976.
- /Schm1/ Schmidt-Morsbach, J., Betonoberflächen - Zweckmäßige Gestaltungsmöglichkeiten, Teil 1 und 2. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 2+3/1983.
- /Scho1/ Scholz, Baustoffkenntnis. Düsseldorf, Werner Verlag. 1999
- /Schol1/ Scholl, E.; Knöfel, D., Der Einfluß von Luftschadstoffen auf Betonbauwerke. Beton. 1/1991.
- /Schr1/ Schröder, F. et al, Einfluß von Luftkohlenensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen. Hrsg.: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb-Heft 182. Berlin, Ernst & Sohn. 1967
- /Schu1/ Schulz, R.-R., Beton als Beschichtungsuntergrund - Über die Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Betonoberflächen mit dem Abreißversuch. RWTH Aachen, Dissertation. 1984
- /Schü1/ Schürmann, K., Instandsetzung von Waschbeton - ein Problem. Das Maler und Lackiererhandwerk. 8/1991.
- /Schüt1/ Schütt, C., Untersuchungen zu Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2001.
- /Schuh1/ Schuhbauer, A., Betonüberdeckung und Karbonatisierungstiefe. Beton. 4/1987.
- /Schul1/ Schultz, G., Kunststoffdispersionen in mineralisch gebundenen Mörteln. VDI-Berichte 384. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1980
- /Sem1/ Semet, W., Die Bedeutung der Oberflächenfestigkeit von Beton und Zementmörtel für nachfolgende Beschichtungen. Bautenschutz und Bausanierung. Sonderdruck.
- /Seml1/ Semle, W.R., Betonschutz und -instandsetzung mit elastischen, zementgebundenen Schlämmen?. Bautenschutz und Bausanierung. Sonderdruck.

-
- /SPSS1/ SPSS 61. Base System User's Guide, Part 2. United States of America, SPSS Inc. 1994
- /Star1/ Stark, J.; Wicht, B., Dauerhaftigkeit von Beton. Hrsg.: F.-A.Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser. 2001
- /Ste1/ Stenner, R., Beschichtungsstoffe für Beton. VDI-Berichte Nr. 384. Düsseldorf, VDI-Verlag. 1980
- /Vol1/ Volkwein, R.; Petri, R.; Springenschmid, R., Oberflächenschutz von Beton mit flexiblen Dichtungsschlämmen. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 8/1988.
- /Wag1/ Wagner, H., Lackkunstharze. München, Carl Hanser Verlag. 1971
- /Wal1/ Walz, K., Carbonatisierung des Betons. Beton. 7/1972.
- /Wal2/ Walz, K.; Hartmann, E., Witterungsbeständigkeit von Beton. Hrsg.: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb-Heft 274. Berlin, Ernst & Sohn. 1977
- /Web1/ Weber, H., Berechnungsverfahren über den Carbonatisierungsfortschritt und die damit verbundene Lebenserwartung von Stahlbetonbauteilen. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 8/1983.
- /Wil1/ Willer, M., Eignung ZTV-SIB geprüfter Instandsetzungssysteme für Schutz und Instandsetzung von Waschbetonoberflächen, Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2000.
- /Wis1/ Wischers, G. et al, Carbonatisierung des Betons - Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung. Beton. 7/1972.
- /Wis2/ Wischers, G., Langzeitverhalten von Betonbauwerken. Betonwerk + Fertigteiltechnik. 8/1984.

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Ausgewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 6 mm	9
Abb. 2: Feingewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 2 mm	10
Abb. 3: im Sandbettverfahren ausgewaschene Betonoberfläche, Rauhtiefe ca. 50 mm	10
Abb. 4: Karbonatisierungsverlauf von Beton (im "Freien unter Dach") nach /Scho1/	14
Abb. 5: Verschmutzung einer weißen Waschbetonfassade	15
Abb. 6: Befall mit Mikroorganismen an einer Waschbetonfassade	16
Abb. 7: Verfahrensweise zur Instandsetzung von Stahlbetonoberflächenschäden	18
Abb. 8: "Orangenschaleneffekt" bei der Rollenapplikation einer Beschichtung	25
Abb. 9: Modell einer Waschbetonoberfläche mit kugelförmigen Zuschlägen	25
Abb. 10: Problem der Differenzdickenmessung auf der Oberfläche eines Zuschlagkorns	27
Abb. 11: Statistische Normalverteilung nach Gauß	29
Abb. 12: Erläuterung der Darstellung von Boxplots	32
Abb. 13: Zementschleier auf den Zuschlägen nach dem Auswaschen	34
Abb. 14: Fehlstellen in einer lasierenden Waschbetonbeschichtung	34
Abb. 15: Waschbetoninstandsetzung Variante I, "elast. Schlämme"	35
Abb. 16: Waschbetoninstandsetzung Variante II "Strukturerhalt"	35
Abb. 17: Waschbetoninstandsetzung Variante III "Strukturverlust"	36
Abb. 18: Grundkörper Waschbetongehwegplatte "Nordisch-Weiß"	39
Abb. 19: Rißbildung an einer elastischen Schlämme	44
Abb. 20: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der Variante II "Strukturerhalt"	46
Abb. 21: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der Variante III "Strukturverlust"	47
Abb. 22: Bauwerk mit Waschbetonoberfläche (Probeflächen im 1. OG bereits angelegt)	51
Abb. 23: Fehlstellen im PCC-Mörtel nach dem Ausstrahlen	57
Abb. 24: Haftzugfestigkeit der Probeflächen am Bauwerk im Alter von 28 Tagen	58
Abb. 25: Haftzugfestigkeit der Probeflächen am Bauwerk im Alter von 10 Monaten	58
Abb. 26: Anschliff der Probefläche C 2 "Strukturverlust" (Vergrößerung 2-fach)	60
Abb. 27: Anschliff der Probefläche A 1 "Strukturerhalt" (Vergrößerung 2-fach)	60
Abb. 28: Verlauf der Karbonatisierungsfront nach 10 Monaten (Vergrößerung 2-fach)	62
Abb. 29: Histogramm der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturverlust"	64

Abb. 30: Verteilung der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturverlust"	65
Abb. 31: Histogramm der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturerhalt"	65
Abb. 32: Verteilung der Schichtdicken, Probeflächen "Strukturerhalt"	66
Abb. 33: Waschbetongrundkörper Kies, Rauhtiefe ca. 6 mm	70
Abb. 34: Waschbetongrundkörper Splitt, Rauhtiefe ca. 6 mm	70
Abb. 35: Oberfläche eines ausgestrahlten PCC-Mörtels mit freigelegtem Grobzuschlag	76
Abb. 36: Verbundkörper Kies mit ausgestrahltem/bündig gespachteltem PCC-Spachtel	77
Abb. 37: Verbundkörper Splitt mit ausgestrahltem/bündig gespachteltem PCC-Spachtel	77
Abb. 38: Tropfenbildung der OS-Beschichtung bei Spritzapplikation	79
Abb. 39: Opake Färbung der lasierenden Beschichtung OS 4-3	80
Abb. 40: Glänzende Oberfläche der Beschichtung OS 4-4	80
Abb. 41: Haftzugfestigkeit und Bruchbild von PCC-Mörteln /-Spachteln	81
Abb. 42: Nicht überdeckter Spalt eines beschichteten Waschbetongrundkörpers	85
Abb. 43: Bündig gespachtelter Waschbetonverbundkörper mit OS-Beschichtung	85
Abb. 44: Beschichtete Faserzementplatte	86
Abb. 45: Einfluß des Applikationsverfahrens auf die Schichtdicke der Beschichtung	87
Abb. 46: Einfluß der Deckschichtenanzahl auf die Schichtdicke der Beschichtung	88
Abb. 47: Einfluß des Untergrundes auf Schichtdicke und Gleichmäßigkeit	89
Abb. 48: Typisches Histogramm einer OS 4 / OS-C Beschichtung	91
Abb. 49: Zuordnung der Schichtdicken-Datensätze zu den verschiedenen Verteilungen	92

8 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Anforderungen der Regelwerke an ausgewählte Oberflächenschutzbeschichtungen	22
Tab. 2:	Anforderungen der Regelwerke an ausgewählte Oberflächenschutzbeschichtungen	23
Tab. 3:	Oberflächenschutzsysteme des ersten Untersuchungsschrittes	39
Tab. 4:	Anzahl für den 1. Untersuchungsschritt hergestellter Verbundkörper	41
Tab. 5:	Materialkennwerte der PCC-Spachtel des 1. Untersuchungsschrittes	42
Tab. 6:	Ausstrahlzeiten der Verbundkörper "Strukturerhalt", MW aus je 8 EW	43
Tab. 7:	Instandsetzungsvarianten und Werkstoffe der Probeflächen am Bauwerk	53
Tab. 8:	Materialkennwerte der PCC-Mörtel (GM) des 2. Untersuchungsschrittes	54
Tab. 9:	Materialkennwerte der PCC-Spachtel (FS) des 2. Untersuchungsschrittes	54
Tab. 10:	Ausstrahlzeiten der PCC-Mörtel am Bauwerk	56
Tab. 11:	Ausstrahlzeiten der PCC-Spachtel am Bauwerk	56
Tab. 12:	Karbonatisierungstiefe am Bauwerk, gemessen nach 10 Monaten an je 3 Bohrkernen	61
Tab. 13:	Schichtdicken der Probeflächen am Bauwerk, Variante "Strukturerhalt"	63
Tab. 14:	Schichtdicken der Probeflächen am Bauwerk, Variante "Strukturverlust"	63
Tab. 15:	Rezeptur der Waschbetongrundkörper	69
Tab. 16:	Art und Anzahl der Probekörper für den 3. Untersuchungsschritt	73
Tab. 17:	Materialkennwerte der PCC-Mörtel GM (MW einer Meßserie)	73
Tab. 18:	Materialkennwerte der PCC-Spachtel FS (MW aus 4 Meßserien)	74
Tab. 19:	Materialkennwerte der Oberflächenschutzbeschichtungen (MW aus 4 Meßserien)	74
Tab. 20:	Ausstrahlzeiten der PCC-Mörtel zur Freilegung der Waschbetonstruktur	75
Tab. 21:	Ausstrahlzeiten der PCC-Spachtel zur Freilegung der Waschbetonstruktur	75
Tab. 22:	Auftragsmengen des flüssigen Beschichtungstoffes	78
Tab. 23:	Gegenüberstellung $d_{\min s}$ -Vert. zu $d_{\min s}$ - Normal	93
Tab. 24:	Zusammenfassung der Abkürzungen der verwendeten Materialien	114
Tab. 25:	Haftzugfestigkeit und Bruchbild "Strukturerhalt", MW aus je 10 EW	114
Tab. 26:	Haftzugfestigkeit und Bruchbild "Strukturverlust", MW aus je 10 EW	115
Tab. 27:	Auftragsmengen Variante "Strukturerhalt"	115
Tab. 28:	Haftzugfestigkeit und Bruchbild, Alter 28 Tagen, Mittelwerte aus je 3 EW	115
Tab. 29:	Haftzugfestigkeit und Bruchbild, Alter 10 Monate, Mittelwerte aus je 3 EW	116

Tab. 30: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der PCC-Mörtel, MW aus je 66 EW	116
Tab. 31: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der PCC-Spachtel, MW aus je 66 EW	116
Tab. 32: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 1, MW aus je 4 EW, (CO ₂ -Konzentration 3%)	117
Tab. 33: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 1, MW aus je 4 EW, (CO ₂ -Konzentration 3%)	117
Tab. 34: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 2, MW aus je 4 EW, (CO ₂ -Konzentration 30%)	118
Tab. 35: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 2, MW aus je 4 EW, (CO ₂ -Konzentration 30%)	118
Tab. 36: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Rollenapplikation	119
Tab. 37: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Spritzapplikation, System 1 und 2	120
Tab. 38: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Spritzapplikation, System 3 und 4	121

9 TABELLENANHANG

Tab. 24: Zusammenfassung der Abkürzungen der verwendeten Materialien

System	PCC-Mörtel	PCC-Spachtel	OS 4 / OS C	OS 5 / OS-D II	Elast. Schlämme
1	GM1	FS1	OS 4-1	OS 5-1	
2	GM2	FS2	OS 4-2	OS 5-2	
3	GM3	FS3	OS 4-3	OS 5-3	
4	GM4	FS4	OS 4-4	OS 5-4	
5		FS5		OS 5-5	
6					ES6
7					ES7

Tab. 25: Haftzugfestigkeit und Bruchbild "Strukturerhalt", MW aus je 10 EW

System	OS	Lagerung	Bruchform [%]						Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
			B	BE	OS	ABE	AOS	AK	
2	FS2	N	0	70	0	0	0	30	2,55
	FS2	FT	0	100	0	0	0	0	3,23
	FS2+OS 4-2	N	0	93	0	0	5	3	2,87
	FS2+OS 4-2	FT	0	98	0	0	1	2	3,26
3	FS3	N	0	97	0	0	0	4	2,36
	FS3	FT	1	90	0	0	0	11	2,80
	FS3+OS 4-3	N	0	91	0	0	0	10	2,20
	FS3+OS 4-3	FT	0	98	0	0	1	2	3,06
4	FS4	N	0	80	0	0	0	20	3,42
	FS4	FT	0	85	0	10	0	6	3,45
	FS4+OS 4-4	N	0	59	0	0	15	26	2,96
	FS4+OS 4-4	FT	0	30	0	0	70	0	3,23

Tab. 26: Haftzugfestigkeit und Bruchbild "Strukturverlust", MW aus je 10 EW

System	OS	Lagerung	Bruchform [%]						Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
			B	BE	OS	ABE	AOS	AK	
1	FS1	N	0	100	0	0	0	0	2,40
	FS1	FT	0	97	0	0	0	4	3,93
	FS1+OS 5-1	N	0	99	0	0	1	0	2,28
	FS1+OS 5-1	FT	0	97	0	0	2	2	3,34
3	FS3	N	0	100	0	0	0	0	3,13
	FS3	FT	34	66	0	0	0	0	4,43
	FS3+OS 5-3	N	0	100	0	0	0	0	3,32
	FS3+OS 5-3	FT	10	84	0	0	5	1	4,10
5	FS5	N	0	100	0	0	0	0	2,55
	FS5	FT	30	70	0	0	0	0	3,96
	FS5+OS 5-5	N	0	98	0	0	0	3	2,53
	FS5+OS 5-5	FT	0	100	0	0	0	0	2,18

Tab. 27: Auftragsmengen Variante "Strukturerhalt"

System	Probefläche	Haftbrücke	PCC-Mörtel	PCC-Spachtel	Gesamt
		[kg/m ²]			
1	A 2	1,8	8,8	2,2	12,8
2	B 2	1,7	12,0	4,1	17,8
3	C 2	1,6	5,3	3,5	10,4
4	D 2	4,0	4,7	1,7	10,4

Tab. 28: Haftzugfestigkeit und Bruchbild, Alter 28 Tagen, Mittelwerte aus je 3 EW

System	Probefläche	Bruchform [%]						Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
		B	BE	OS	ABE	AOS	AK	
1	A1	0	52	0	0	18	30	1,44
	A2	0	50	0	33	17	0	1,01
	A3	0	15	10	0	48	27	0,96
2	B1	8	38	0	7	5	43	1,31
	B2	0	68	0	15	0	15	1,54
	B3	18	51	0	13	0	18	1,52
3	C1	8	52	0	0	10	30	1,71
	C2	0	72	0	0	5	23	1,50
	C3	25	68	0	0	0	7	1,43
4	D1	50	10	0	0	12	28	2,03
	D2	0	39	0	0	61	0	1,95

Tab. 29: Haftzugfestigkeit und Bruchbild, Alter 10 Monate, Mittelwerte aus je 3 EW

System	Probefläche	Bruchform [%]						Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
		B	BE	OS	ABE	AOS	AK	
1	A1	0	53	0	0	13	33	1,43
	A2	0	0	0	67	33		1,13
	A3	0	0	0	0	80	20	0,80
2	B1	17	37	0	0	0	47	1,35
	B2	0	80	0	17	0	0	1,37
	B3	30	23	0	13	0	33	1,65
3	C1	17	67	0	0	0	17	1,94
	C2	0	100	0	0	0	0	1,35
	C3	50	37	0	0	0	13	1,87
4	D1	33	13	0	0	0	53	1,67
	D2	0	67	0	0	33	0	2,11

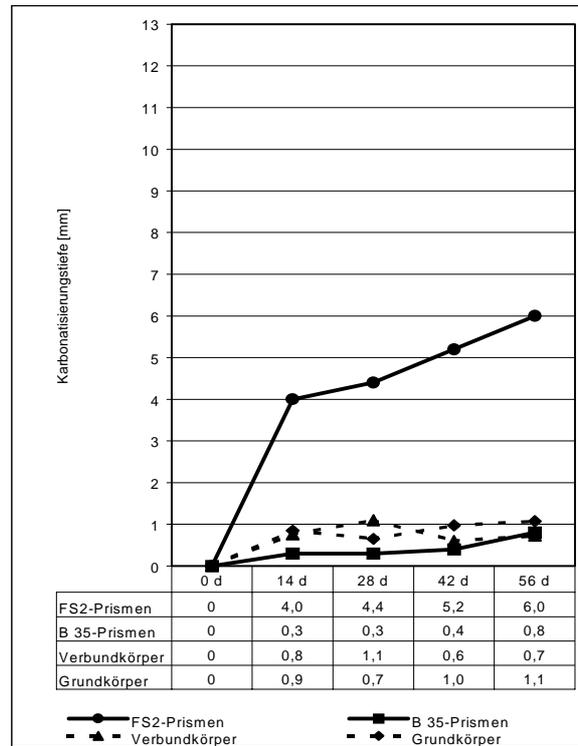
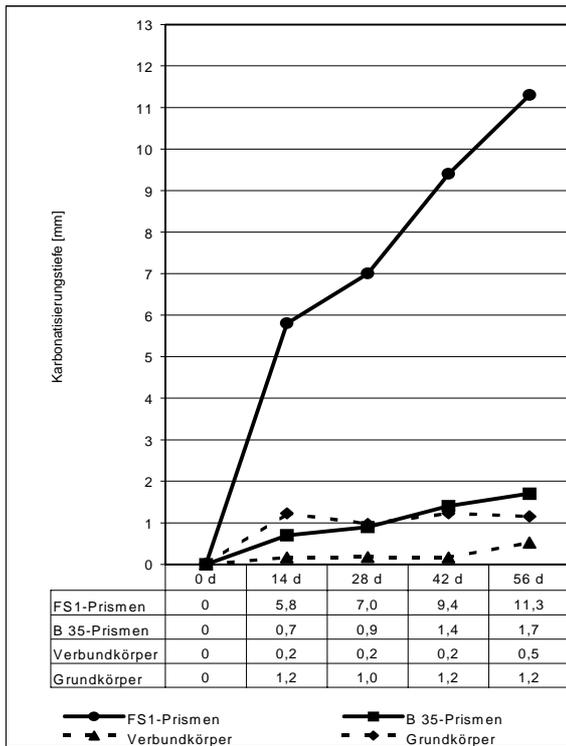
Tab. 30: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der PCC-Mörtel, MW aus je 66 EW

System	PCC-Mörtel	Bruchform [%]				Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
		B	BE	ABE	AK	
1	GM 1	96	2	2	0	1,75
2	GM 2	77	20	3	0	2,52
3	GM 3	76	11	13	0	2,23
4	GM 4	28	67	0	5	1,99

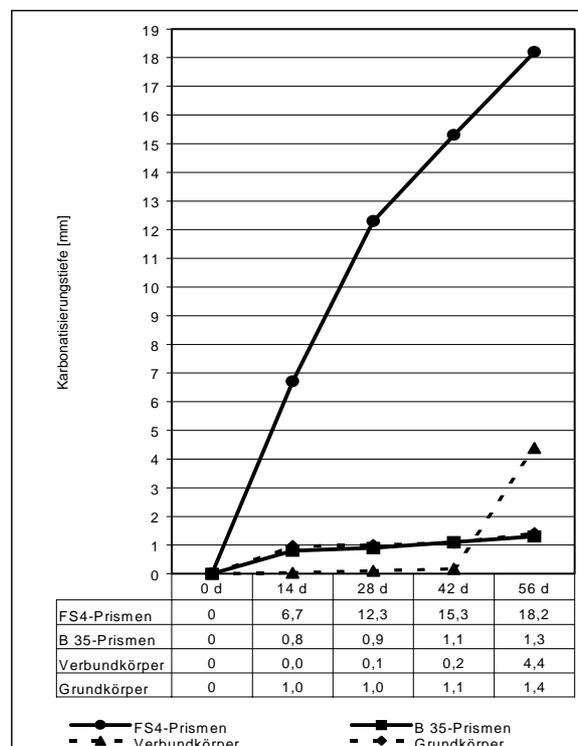
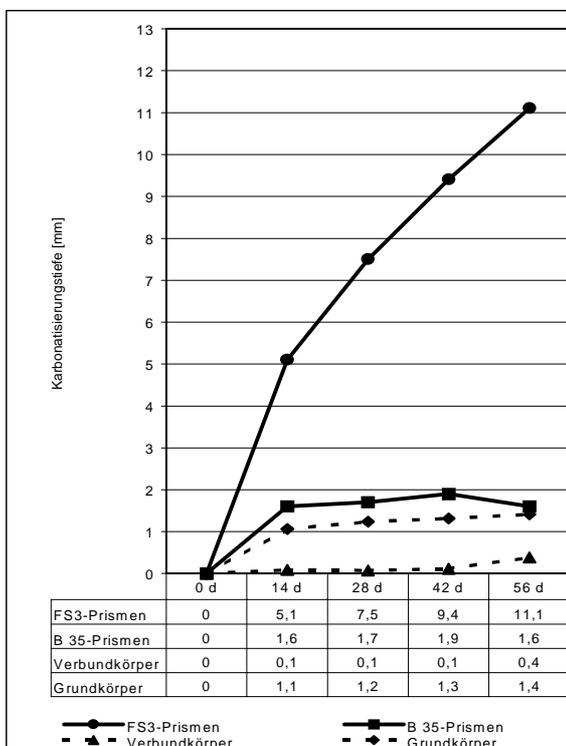
Tab. 31: Haftzugfestigkeit und Bruchbild der PCC-Spachtel, MW aus je 66 EW

System	PCC-Spachtel	Bruchform [%]				Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
		B	BE	ABE	AK	
1	FS 1	88	1	11	0	1,30
2	FS 2	94	3	3	0	1,54
3	FS 3	68	23	7	2	1,86
4	FS 4	82	11	5	2	1,72

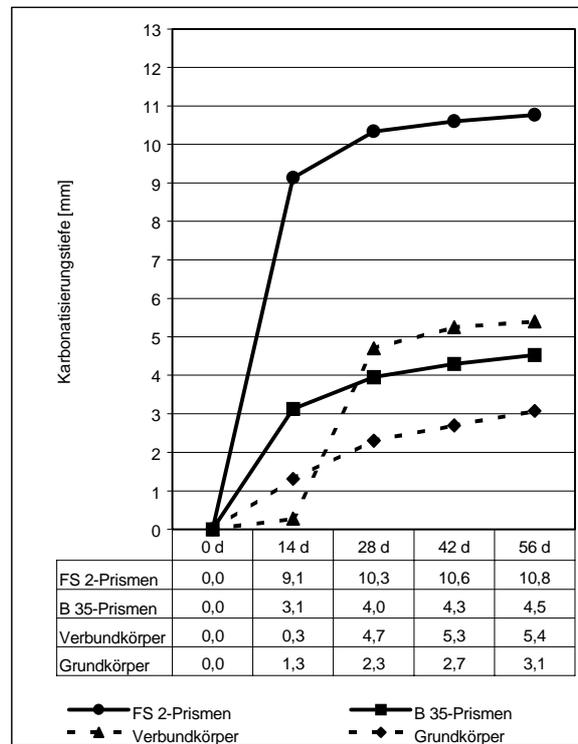
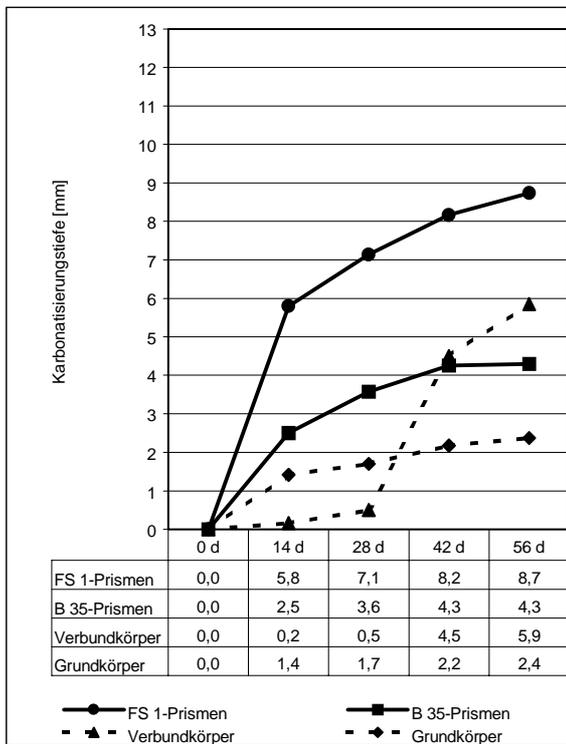
Tab. 32: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 1, MW aus je 4 EW, (CO₂-Konzentration 3%)



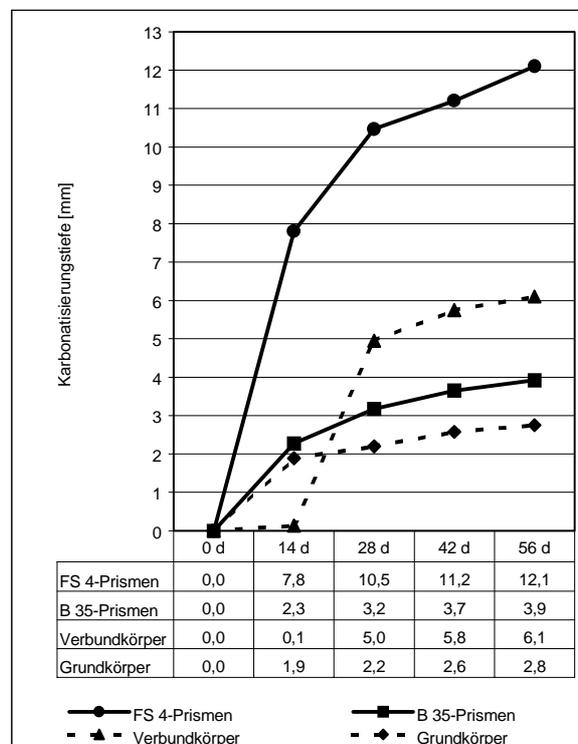
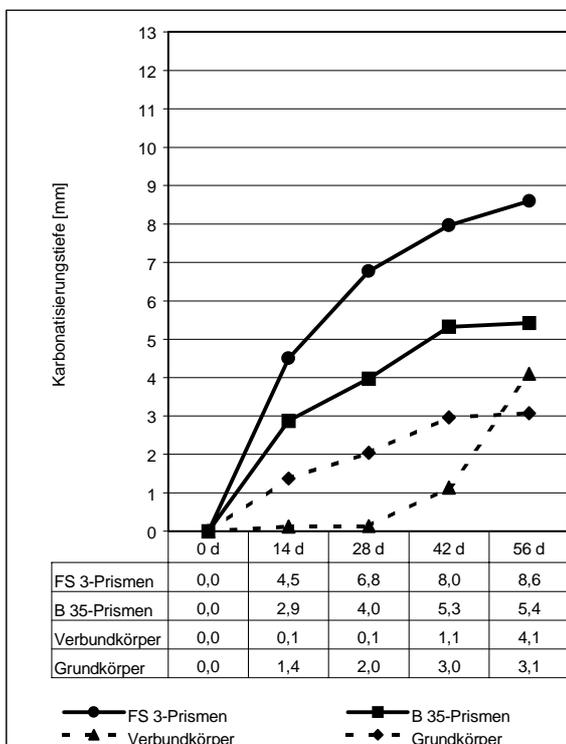
Tab. 33: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 1, MW aus je 4 EW, (CO₂-Konzentration 3%)



Tab. 34: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 2, MW aus je 4 EW, (CO₂-Konzentration 30%)



Tab. 35: Karbonatisierungsmessungen Meßserie 2, MW aus je 4 EW, (CO₂-Konzentration 30%)



Die Probekörper der Schichtdickenmessungen sind nach folgendem Schlüssel kodiert:



Tab. 36: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Rollenapplikation

System	Code	Verteilung	d _{min s} -Vert.	d _{min s} -Norm.	ssa	MW	Anzahl	Anzahl
			[µm]		[-]	[µm]	Meßwerte	Fehlstellen
1	A2R	Lognormal	49	45	19	77	400	0
	A2R	Lognormal	32	28	22	64	390	1
	A3R	Lognormal	40	36	23	74	394	0
	B2R	Gamma	32	29	29	62	400	0
	F2R	n. parametrisch	60	52	11	71	194	0
	F3R	n. parametrisch	60	65	12	85	198	0
2	A2R	n. parametrisch	40	9	62	111	400	4
	A2R	Normal	-	52	19	83	382	0
	A3R	Normal	-	60	19	92	394	0
	B2R	n. parametrisch	60	40	32	93	400	0
	F2R	n. parametrisch	60	62	11	80	194	0
	F3R	n. parametrisch	80	77	13	98	194	0
3	A2R	Lognormal	37	15	49	95	399	0
	A2R	Lognormal	53	45	32	97	390	0
	A2R	n. parametrisch	92	60	77	186	399	0
	A3R	n. parametrisch	80	53	45	127	391	0
	A3R	n. parametrisch	133	56	124	259	400	0
	B2R	Gamma	40	32	35	89	399	0
	F2R	n. parametrisch	80	80	13	101	195	0
	F3R	n. parametrisch	80	80	11	99	195	0
4	A2R	Gamma	15	8	18	37	400	20
	A2R	Gamma	24	20	22	55	398	2
	A3R	Gamma	33	27	29	75	388	1
	B2R	n. parametrisch	20	0	21	34	400	13
	F2R	-	0	-	-	-	-	-
	F3R	n. parametrisch	40	37	10	53	200	0

= d_{min s} ≥ 80 µm

Tab. 37: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Spritzapplikation, System 1 und 2

System	Code	Verteilung	$d_{\min s}$ -Vert.	$d_{\min s}$ -Norm.	ssa	MW	Anzahl	Anzahl
			[μm]		[-]	[μm]	Meßwerte	Fehlstellen
1	A2S	Gamma	116	114	27	158	392	0
	A2S	n. parametrisch	70	46	30	95	391	0
	A3S	Lognormal	73	59	43	130	393	0
	A3S	n. parametrisch	75	91	48	169	387	0
	B2S	Normal	-	101	31	151	393	0
	B3S	Lognormal	81	69	43	139	394	0
	G2S	n. parametrisch	0	9	43	79	382	26
	G2S	Gamma	72	62	44	133	388	6
	G3S	Normal	-	48	86	188	388	5
	G3S	n. parametrisch	92	65	68	177	398	1
	F2S	n. parametrisch	140	125	13	146	200	0
	F3S	Lognormal	126	126	6	137	197	0
2	A2S	n. parametrisch	70	69	17	96	360	0
	A2S	n. parametrisch	61	56	34	113	400	0
	A3S	Gamma	100	95	37	156	398	0
	A3S	Normal	-	62	35	120	398	0
	B2S	Lognormal	81	77	21	111	359	0
	B3S	Normal	-	88	43	158	398	0
	G2S	n. parametrisch	0	39	31	90	381	22
	G2S	Gamma	47	26	42	96	387	16
	G3S	Normal	-	42	50	124	394	13
	G3S	Gamma	76	67	44	138	398	0
	F2S	Lognormal	87	86	9	101	199	0
	F3S	n. parametrisch	190	191	5	200	200	0

= $d_{\min s} \geq 80 \mu\text{m}$

Tab. 38: Zusammenfassung Schichtdickenmeßwerte, Spritzapplikation, System 3 und 4

System	Code	Verteilung	d _{min s} -Vert.	d _{min s} -Norm.	ssa	MW	Anzahl	Anzahl
			[µm]		[-]	[µm]	Meßwerte	Fehlstellen
3	A2S	Lognormal	90	85	27	129	400	0
	A2S	Gamma	59	34	63	138	395	7
	A2S	n. parametrisch	242	220	70	335	400	0
	A3S	n. parametrisch	100	83	45	157	400	0
	A3S	Gamma	87	44	110	225	394	6
	A3S	n. parametrisch	383	367	85	507	400	0
	B2S	n. parametrisch	100	77	32	130	399	0
	B3S	n. parametrisch	100	85	44	157	400	0
	G2S	n. parametrisch	80	79	32	132	399	6
	G2S	n. parametrisch	20	23	65	130	397	17
	G3S	n. parametrisch	60	61	85	200	393	4
	G3S	n. parametrisch	80	46	74	166	390	0
	F2S	n. parametrisch	80	74	27	118	199	0
	F3S	n. parametrisch	200	190	25	230	200	0
4	A2S	Gamma	25	2	30	51	400	47
	A2S	Gamma	35	18	37	78	395	18
	A3S	Normal	-	11	52	97	400	23
	A3S	Lognormal	61	49	40	115	400	0
	B2S	Gamma	30	10	42	79	400	16
	B3S	Normal	-	15	58	110	400	13
	G2S	Gamma	18	-35	46	41	398	143
	G2S	Gamma	18	-32	57	61	398	75
	G3S	n. parametrisch	0	0	41	68	400	27
	G3S	Gamma	32	-4	62	98	395	32
	F2S	Normal	-	33	7	45	200	0
F3S	n. parametrisch	41	41	12	66	200	0	

 = d_{min s} ≥ 80 µm

Lebenslauf

- seit 10.1995 wissenschaftliche Mitarbeiterin
Lehrstuhl für Werkstoffe des Bauwesens der Universität Dortmund
- 06.1993 – 09.1995 Diplom-Ingenieurin
Bau-Institut Hamburg-Harburg
- 10.1984 – 05.1993 Studium der Architektur
Universität Dortmund
- 05.1984 Abitur
Max-Planck-Gymnasium Dortmund
- 07.11.1965 geboren in Dortmund