

**INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG**  
**Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen  
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · [www.ibac.rwth-aachen.de](http://www.ibac.rwth-aachen.de)

**Forschungsbericht**

**F 804**



**Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung**

**Abteilung VII**

Leitung: Dir. u. Prof. Dr.-Ing. M. Maultzsch

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Telefon (0 30) 81 04-17 00 · Telefax (0 30) 81 04-17 07 · [www.bam.de](http://www.bam.de)

Entwicklung eines kombinierten Schutzsystems für chloridbelastete Betonflächen aus Spritzverzinkung mit abdichtender Beschichtung

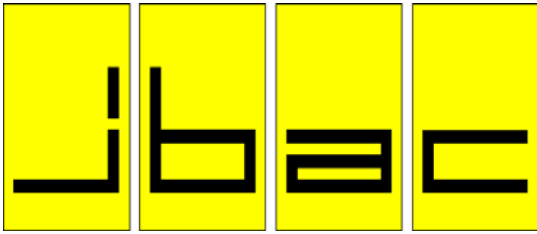


**MPA Otto-Graf-Institut,  
Universität Stuttgart**

Leitung: Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart (Vaihingen)

Telefon (07 11) 6 85-33 23 · Telefax (07 11) 6 85-68 20 · [www.fmpa.de](http://www.fmpa.de)



# INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen  
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · www.ibac.rwth-aachen.de



# BUNDESANSTALT FÜR MATERIAL- FORSCHUNG UND -PRÜFUNG

Abteilung VII

Leitung: Dir. u. Prof. Dr.-Ing. M. Maultzsch

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
Telefon (0 30) 81 04-17 00 · Telefax (0 30) 81 04-17 07 · www.bam.de



# MPA Otto-Graf-Institut

Universität Stuttgart

Leitung: Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart (Vaihingen)  
Telefon (07 11) 6 85-33 23 · Telefax (07 11) 6 85-68 20 · www.fmpa.de

BM/Fk  
7. Ausfertigung

## THEMA

Entwicklung eines kombinierten Schutzsystems  
für chloridbelastete Betonflächen aus Spritz-  
verzinkung mit abdichtender Beschichtung

- ABSCHLUSSBERICHT -

Forschungsbericht Nr.

F 804  
vom 08.04.2004

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. M. Raupach  
Dr.-Ing. J. Mietz  
Prof. Dr.-Ing. U. Nürnberger  
Dipl.-Ing. L. Wolff  
Dipl.-Ing. M. Bruns  
Dr.-Ing. A. Burkert  
Dipl.-Ing. G. Eich  
Dr. K. Menzel

Auftraggeber/  
Förderer

Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.  
Postfach 15 01 04

60061 Frankfurt

Auftragsdatum

27.03.2001

Aktenzeichen

AiF-Nr. 12818 N/2

Dieser Bericht umfasst 121 Seiten, davon 105 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

**INHALTSVERZEICHNIS**

**Seite**

1	ZUSAMMENFASSUNG .....	1
2	WISSENSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG.....	2
3	ZIELSETZUNG.....	3
4	ERGEBNISSE .....	3
4.1	Allgemeines .....	3
4.2	Adhäsion zwischen OS-System und Spritzverzinkung (ibac).....	4
4.2.1	Grundkörper.....	4
4.2.2	Aufbringen der Zinkbeschichtung.....	4
4.2.3	Untersuchte Oberflächenschutzsysteme .....	6
4.2.3.1	Allgemeines .....	6
4.2.3.2	OS-11a .....	8
4.2.3.3	OS-13 .....	9
4.2.3.4	Systeme der ZTB-BEL-B, Teil 1 .....	10
4.2.4	Künstliche Beanspruchung.....	11
4.2.4.1	Übersicht.....	11
4.2.4.2	Gewitterregen.....	11
4.2.4.3	Temperaturwechselbeanspruchung mit Tausalzeinfluss .....	12
4.2.4.4	Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzeinfluss.....	13
4.2.4.5	Wärmebeanspruchung .....	14
4.2.4.6	Temperatur-/Wasserwechselbeanspruchung .....	14
4.2.4.7	Prüfung der Probekörper.....	15
4.2.5	Darstellung der Ergebnisse .....	15
4.2.5.1	Haftzugfestigkeiten.....	15
4.2.5.2	Blasenbildung bei den mit OS-13 beschichteten Platten.....	20
4.2.5.3	Bewertung der Haftzugfestigkeiten und Auswahl eines geeigneten Oberflächenschutzsystems für die weiteren Untersuchungen des ibac und der BAM .....	21
4.2.5.4	Untersuchung der Kontaktzone Beton – Zink .....	23

**Seite**

4.3	Laboruntersuchungen zum Kathodischen Korrosionsschutz (BAM).....	25
4.3.1	Herstellung der Stahlbetonprobekörper, Betonrezeptur und Frischbeton- kennwerte.....	25
4.3.2	Installation der Sensoren und der Messwerterfassung.....	27
4.3.2.1	Multiring-Elektroden (MRE).....	27
4.3.2.2	Mangandioxid-Elektroden (MnO <sub>2</sub> -Elektroden).....	28
4.3.3	Applikation der Zinkspritzschicht und des Oberflächenschutzsystems .....	29
4.3.4	Auslagerung und Messungen an den Probekörpern .....	31
4.3.5	Ergebnisse .....	33
4.3.5.1	Ergebnisse der Potential- und Strommessungen.....	33
4.3.5.2	Ergebnisse der Feuchtemessungen .....	42
4.3.5.3	Verhalten des Oberflächenschutzsystems.....	46
4.3.5.4	Zustand der ausgebauten Bewehrungsstäbe .....	49
4.3.6	Diskussion.....	55
4.3.7	Zusammenfassung.....	61
4.4	Zusatzuntersuchungen zur Phasengrenze Zink/Beton (MPA).....	62
4.4.1	Probekörper.....	62
4.4.2	Untersuchungen .....	63
4.4.2.1	Vorbereitende Messungen vor Ort.....	63
4.4.2.2	Messungen an ausgelagerten Probekörpern.....	63
4.4.3	Ergebnisse .....	64
4.4.3.1	Vorbereitende Messungen vor Ort.....	64
4.4.3.2	Messungen an ausgelagerten Probekörpern.....	65
4.4.3.2.1	Ruhepotentiale .....	65
4.4.3.2.2	Potential – und Stromverlauf bei kathodischem Schutz .....	66
4.4.3.2.3	Chloridverteilung .....	68
4.4.3.2.4	Haftung der Zinkschicht .....	68
4.4.3.2.5	Korrosionszustand der Bewehrung und der Zinkschicht.....	71
4.4.3.2.6	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und Mikroanalyse an Spritz-Zinkschichten.....	74
4.4.3.2.7	Versuche zur „Reaktivierung“ der Zinkschicht.....	75
4.4.4	Zusammenfassung.....	77



		<b>Seite</b>
4.5	Untersuchungen unter Praxisbedingungen an einem Parkhaus (ibac).....	77
4.5.1	Allgemeines .....	77
4.5.2	Voruntersuchungen und Vorbereitung der Probeflächen .....	78
4.5.3	Eingebaute Sensoren.....	80
4.5.4	Installation des Kombinationssystems.....	82
4.5.5	Messinstallation .....	84
4.5.6	Versuchsprogramm.....	85
4.5.7	Ergebnisse .....	86
4.5.7.1	Feuchteentwicklung.....	86
4.5.7.2	Wirksamkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes .....	88
4.5.7.2.1	Schutzstrom.....	88
4.5.7.2.2	Ergebnisse der Potential- und Depolarisationsmessungen .....	91
4.5.8	Zusammenfassung.....	94
5	GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE MIT DEN ZIEL- SETZUNGEN DES URSPRÜNGLICHEN FORSCHUNGSANTRAGS....	95
6	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER FORTSCHRITT UND NUTZEN FÜR KLEINE UND MITTLERE UNTERNEHMEN .....	97
7	DANKSAGUNG .....	97
8	SCHUTZRECHTE .....	97
9	VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE .....	98
10	DURCHFÜHRENDE FORSCHUNGSSTELLEN .....	99
10.1	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.....	99
10.2	Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, ibac .....	99
10.3	Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart .....	99
11	LITERATUR .....	100
	BILDER.....	B1-B16

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Die Zielsetzung dieses Projektes war es, ein kombiniertes Schutzsystem aus Spritzverzinkung und abdichtendem Oberflächenschutzsystem für die Instandsetzung chloridbelasteter und korrosionsgeschädigter Stahlbetonbauteile zu entwickeln. Dabei soll die Spritzverzinkung der Betonoberfläche in den ersten Jahren nach der Instandsetzung einen kathodischen Korrosionsschutz der Bewehrung bewirken, bis der Beton infolge des Oberflächenschutzsystems soweit ausgetrocknet ist, dass auch ohne kathodischen Schutz praktisch keine Korrosion der Bewehrung mehr stattfinden kann.

Anhand von Untersuchungen zur Haftung zwischen Beton, Zinkschicht und verschiedenen Oberflächenschutzsystemen wurde der Aufbau des kombinierten Schutzsystems entwickelt. Es wurden verschiedene OS-11a-Systeme ein OS-13-System sowie zwei Systeme nach ZTV-ING, Teil 7 vor und nach künstlicher Bewitterung untersucht. Anhand der Ergebnisse wurde für das kombinierte System ein OS-11a-System ausgewählt und im Weiteren hinsichtlich der Wirksamkeit des kathodischen Schutzes sowie hinsichtlich der Austrocknung des Betons untersucht.

Es zeigte sich sowohl an ausgelagerten Prüfkörpern sowie auf einer angelegten Versuchsfläche auf dem Freideck eines Parkhauses, dass ein wirksamer galvanischer kathodischer Korrosionsschutz der Bewehrung nur bei sehr hohen Chloridgehalten (4 M.-% bezogen auf den Zementgehalt) erreicht werden kann. Bei geringeren untersuchten Chloridgehalten kam es vermutlich infolge der Austrocknung der Zink/Beton-Kontaktzone nach relativ kurzer Zeit zu einer Inaktivierung des Zinks. Bei Chloridgehalten von 4 M.-% bildeten sich zwischen der Zinkschicht und dem ausgewählten OS-System gasgefüllte Blasen. Diese Problematik, sowie die Tatsache dass die Wirksamkeit des Prinzips W (Austrocknung des Betons) bei derart hohen Chloridgehalten bezweifelt werden muss, grenzt die Anwendbarkeit des Kombinationssystems mit der Zinkschicht als Opferanode deutlich ein.

An neun Jahre alten, ausgelagerten Prüfkörpern durchgeführte Untersuchungen zeigten jedoch, dass mittels Fremdstrombeaufschlagung zwischen Zinkschicht und Bewehrung ein wirksamer kathodischer Schutz auch bei geringeren Chloridgehalten erreicht werden kann. Der Einsatz des entwickelten Kombinationssystems mit Fremdstrombeaufschlagung erscheint somit durchaus durchführbar. Dabei sollte der Fremdstrom jedoch vorsichtig dosiert werden, um den Haftverbund zum Zink nicht zu sehr zu schwächen.

Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

## 2 WISSENSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG

In den letzten Jahren sind zahlreiche, teilweise schwerwiegende Schäden an chlorid-beanspruchten Stahlbetonflächen aufgetreten, die aufwendige Instandsetzungsmaßnahmen erfordern. Davon betroffen sind vor allem Verkehrsflächen, die Tausalzen aus dem Winterdienst ausgesetzt sind, aber auch Bauwerke in Küstennähe oder aggressiven Böden. Insbesondere bei Parkhäusern und Brücken sind die Schäden besonders stark ausgeprägt, da dort in großem Umfang Chloride auf horizontale Flächen einwirken und bereits innerhalb von wenigen Jahren bis zur Bewehrung vordringen können, wodurch hohe Korrosionsgeschwindigkeiten ausgelöst werden. Erste Folgen der Korrosion sind Risse und Abplatzungen, die im Laufe der Zeit bei Verkehrsbauwerken bis zu unzulässigen Beeinträchtigungen der Tragfähigkeit führen können. Für die Instandsetzung solcher Betonflächen mit hohen Chloridgehalten bis in große Tiefenlagen kommen nur wenige Instandsetzungsvarianten in Frage:

- Üblicherweise wird der Beton mit unzulässigen Chloridgehalten durch Abstemmen oder Strahlen entfernt, was jedoch mit hohem Aufwand verbunden und aus statischer Sicht teilweise problematisch ist.
- Gemäß Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ /1/ kommt auch der kathodische Korrosionsschutz als Schutzverfahren in Frage. Der kathodische Korrosionsschutz mit Fremdstrom wird in der Praxis in Deutschland bei Parkhäusern jedoch nicht angewendet, was einerseits auf die Installationskosten, insbesondere aber auf die erforderliche Wartung des Systems zurückzuführen ist, die für Stahlbetonbauten in der Regel nicht akzeptiert wird. Eine Alternative bildet die Installation von KKS-Systemen mit Spritzverzinkungen (galvanische Anode), über die insbesondere aus dem nordamerikanischen Raum Veröffentlichungen vorliegen /2 bis 11/.
- Bei nicht zu hohen Chloridgehalten käme auch gem. der o. g. Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton ein Trockenlegen in Frage, wobei durch Applikation eines praktisch wasserundurchlässigen Oberflächenschutzsystems der Wassergehalt des Betons auf so geringe Werte reduziert wird, dass es nicht mehr zu Korrosionsschäden kommt. Dieses Verfahren wird jedoch in der Praxis ebenfalls nicht angewendet, weil unklar ist, wie lange es dauert, bis der Beton ausreichend getrocknet ist. Man geht davon aus, dass in diesem Zeitraum noch erhebliche Korrosionsgeschwindigkeiten auftreten können, so dass dieses Verfahren in der Praxis als unsicher eingestuft wird. Dazu ist jedoch anzumerken, dass hinsichtlich dieses Verfahrens keine umfassenden Ergebnisse

gezielter Untersuchungen unter praxisähnlichen Bedingungen vorliegen. Dabei gibt es Forschungsergebnisse, die zeigen, dass bei Chloridgehalten in der Größenordnung von 1 bis 2 M.-% bezogen auf den Zementgehalt /12/ oder höher durchaus das Prinzip des Trockenlegens anwendbar sein kann.

### **3 ZIELSETZUNG**

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein kombiniertes Schutzsystem zu entwickeln, bei dem das Prinzip des Trockenlegens mit einem temporären kathodischen Korrosionsschutz für die Übergangszeit des Austrocknens ergänzt wird, so dass nach der Instandsetzung keine nennenswerte Korrosionsgefährdung mehr besteht. Dabei soll für den temporären Korrosionsschutz eine Spritzverzinkung auf die Betonoberflächen aufgebracht werden.

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse von Spritzverzinkungen haben gezeigt, dass die Nutzungsdauer einer Zinkspritzschicht für den kathodischen Korrosionsschutz begrenzt ist, für den angestrebten Zeitraum jedoch durchaus wirksam sein kann. Vor einem Einsatz unter Praxisbedingungen müssen vor allem folgende Fragen beantwortet werden:

- Ist der Verbund zwischen Spritzverzinkung und Beton sowie zum Oberflächen-schutzsystem ausreichend und dauerhaft?
- Reicht ein galvanischer Schutz zwischen Zink als Opferanode und der Bewehrung aus, oder muss Fremdstrom eingesetzt werden, um die Zinkschicht nach einer gewissen Zeit bzw. regelmäßig zu aktivieren?
- Welche Zinkschichtdicken sind erforderlich, um für den Übergangszeitraum bis zur ausreichenden Trockenlegung einen Schutz der Bewehrung zu erreichen?
- Bis zu welchen Chloridgehalten im Beton ist das kombinierte Schutzverfahren anwendbar?

## **4 ERGEBNISSE**

### **4.1 Allgemeines**

Zur Klärung der oben genannten Fragestellungen wurden an den drei beteiligten Forschungsstellen folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Untersuchungen zur Adhäsion zwischen OS System und Spritzverzinkung (ibac),
- Laboruntersuchungen zum Kathodischen Korrosionsschutz (BAM),
- Zusatzuntersuchungen zur Phasengrenze Zink/Beton (MPA),
- Untersuchungen unter Praxisbedingungen an einem Parkhaus (ibac).

Diese Versuchsreihen sowie die daraus erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

## **4.2 Adhäsion zwischen OS-System und Spritzverzinkung (ibac)**

### **4.2.1 Grundkörper**

Als Grundkörper zur Untersuchung der Adhäsion zwischen OS-System und Spritzverzinkung wurden am ibac hergestellte Betonprobekörper der Festigkeitsklasse B35 gewählt. Die Betonrezeptur wurde mit der BAM in Berlin abgestimmt. Die Betonfestigkeitsklasse B35 entspricht dem Konstruktionsbeton vieler Parkhäuser und Parkdecks und ist daher in bezug auf Porosität, Porengrößenverteilung sowie Oberflächenzugfestigkeit als praxisnah anzusehen. Die Rauheit der Probekörper wurde durch Sandstrahlen auf ca. 0,5 mm eingestellt. Die Überprüfung erfolgte durch das Sandflächenverfahren. Die Probekörperabmessungen betragen  $30 \cdot 30 \cdot 6 \text{ cm}^3$ . Zur besseren Abbildung der in Instandsetzungsfällen vorliegenden hohen Chloridbelastungen der betreffenden Bauwerke wurde dem Frischbeton ein Chloridgehalt von 2 M.-% bezogen auf den Zementgehalt zugegeben.

Die Probekörper wurden am ibac hergestellt, nach einem Tag ausgeschalt und bis zu einem Alter von 7 Tagen im Feuchtraum bei  $20 \text{ °C}/95 \text{ \% r. F.}$  gelagert. Anschließend erfolgte die Lagerung im Klima  $23 \text{ °C}/50 \text{ r. F.}$

### **4.2.2 Aufbringen der Zinkbeschichtung**

Die Zinkbeschichtung wurde im Alter von rund 4 Monaten auf die Probekörper durch das sogenannte Drahtlichtbogenspritzverfahren bei der Firma Grillo, Duisburg, aufgebracht. Dabei werden zwei Drähte an der Düsenspitze so verschaltet, dass sich ein Lichtbogen bildet, der die Zinkdrähte bis zum Schmelzpunkt erwärmt. Die sich bildenden Schmelztropfen werden über Druckluft zerstäubt und auf die Substratoberfläche beschleunigt. Die in der Luft fein dispergierten Tröpfchen kühlen schnell ab, so dass auf der Substratoberfläche keine schädigenden Temperaturgradienten entstehen.

Vor Aufbringen der Zinkbeschichtung wurde die Probekörperoberfläche durch einen Gasbrenner auf etwa 100 °C erwärmt. Die Temperatur wurde mit einem Oberflächenthermometer kontrolliert. Anschließend erfolgte die Zinkbeschichtung in mehreren Lagen. Nach Applikation wurden die Schichtdicken mittels eines Schichtdickenmessgerätes basierend auf der Mikrowellenreflektionsmessung überprüft. Bild 4.2-1 zeigt die Beschichtung eines Probekörpers im automatischen Spritzstand.

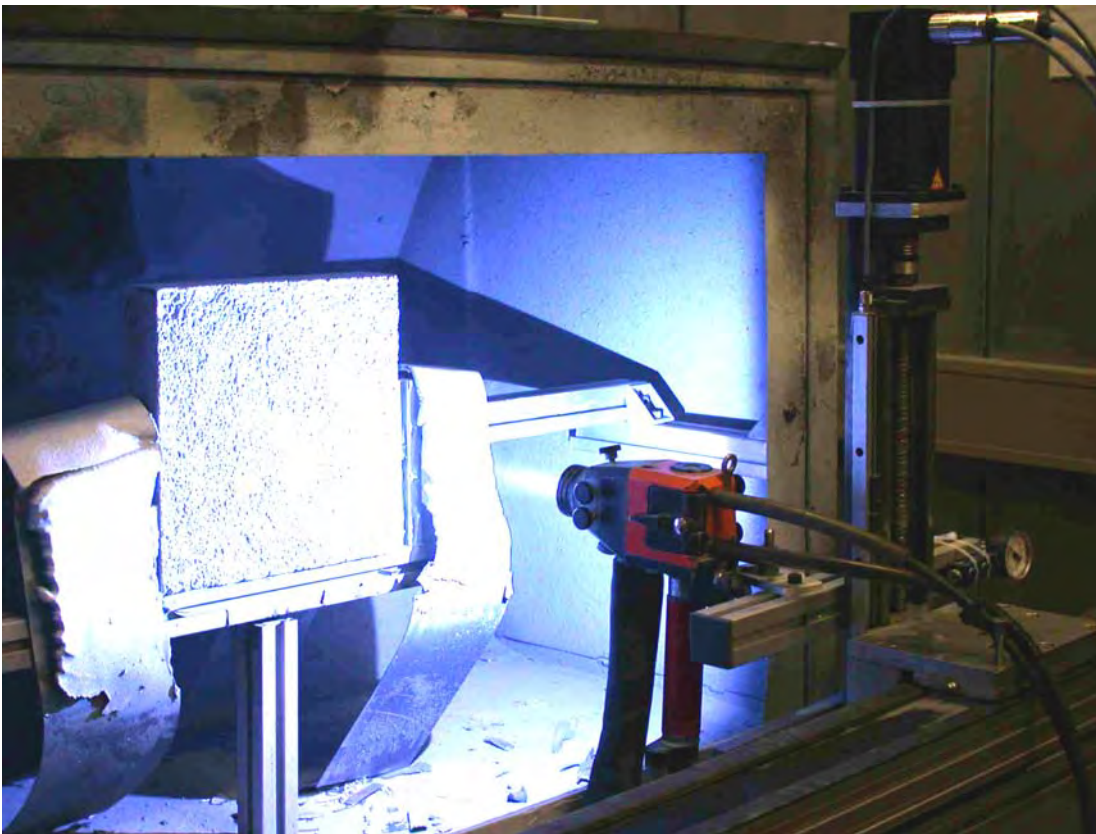


Bild 4.2-1: Applikation der Zinkbeschichtung im automatischen Spritzstand

Nachfolgend sind die wichtigsten Spritzparameter zusammengestellt:

- Zerstäuberdruck: 4 bar
- Beschichtungsdurchgänge: 3
- Schichtdicke: 250 µm
- Vorwärmung: keine
- Spritzmaterial: Feinzink 99,99

Nach Abschluss der Zinkbeschichtung lagerten die Probekörper bis zum Auftrag der Oberflächenschutzsysteme bei 23 °C/50 r. F.



## **4.2.3      Untersuchte Oberflächenschutzsysteme**

### **4.2.3.1    Allgemeines**

Um verschiedene Einsatzbereiche dieses neuartigen Instandsetzungsprinzips zu untersuchen, wurde eine Vielzahl an rissüberbrückenden und befahrbaren Beschichtungen ausgewählt. Dabei wurden ausschließlich handelsübliche und nach ZTV-ING Teil 7.1 /13/ bzw. der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ des DAfStb /1/ geprüfte Systeme verwendet.

Da allerdings infolge der begrenzten Wirkungsdauer der Spritzverzinkung eine Austrocknung des Betons zur dauerhaften Verlangsamung der Korrosionsraten erforderlich ist, sind Gussasphaltsysteme unter Umständen zu dicht. Von einer nennenswerten Austrocknung des Betons ist bei Auftrag einer Bitumen-Schweißbahn und anschließender Gussasphaltschicht nicht auszugehen.

Eine genaue Übersicht der untersuchten Systeme mit Darstellung der Variation der Grundierung und Kratzspachtelung enthält die folgende Tabelle 4.2-1.

Tabelle 4.2-1: Aufbau und Übersicht der applizierten Systeme

OS-System	Grundierung	Kratz- spachtelung	hauptsächlich wirksame Oberflächen- schutzschicht	Verschleißschicht
1	2	3	4	5
OS-11a 1	Ja	Ja	elastische Oberflächen- schutzschicht hwO (Polyurethan)	vorgefüllte Verschleißschicht (Epoxidharz) mit anschließender Deckversiegelung
		Nein		
	Nein	Ja		
		Nein		
OS-11a 2	Ja	Ja		
		Nein		
	Nein	Ja		
		Nein		
OS 11a 3	Ja	Ja		
		Nein		
	Nein	Ja		
		Nein		
OS-13	Ja	Ja	vorgefüllte rissüberbrückende Verschleißschicht mit an- schließender Deckversiegelung	
ZTV-BEL-B, Teil 1, System 1		Nein	Bitumen- Schweißbahn	Gussasphalt
ZTV-BEL-B, Teil 1, System 2				

Die Applikation der einzelnen Schichten erfolgte durch Mitarbeiter des ibac gemäß den Vorgaben der Hersteller. Die Kontrolle der Sollschichtdicken erfolgte durch Wägen der einzelnen Probekörper während der Beschichtung über die Auftragsmenge der betreffenden Schicht.



#### 4.2.3.2 OS-11a

Das System der Klasse OS-11a stellt das zur Zeit übliche OS-System für freibewitterte Parkdecks dar. Der Regelaufbau dieses Systems besteht aus den folgenden Komponenten:

- Grundierung,
- ggf. Kratzspachtelung,
- elastische rissüberbrückende Schicht (hwO),
- vorgefüllte Verschleißschicht,
- i. d. R. Deckversiegelung.

Die Grundierung dient der Verbesserung der Adhäsion zwischen Untergrund und den nachfolgenden Schichten, bewirkt eine geringfügige Verfestigung des Untergrundes und trennt das alkalische Milieu des mineralischen Untergrundes von den weiteren Schichten. Da die genannten Aufgaben ggf. auch durch die applizierte Zinkschicht aufgenommen werden können, wurden im Rahmen der Laboruntersuchungen sowohl Probekörper mit und ohne Grundierung untersucht. Die Kratzspachtelung dient der Verringerung der Rautiefe des Betons und besteht in der Regel aus einem Epoxidharzmörtel, gefüllt mit Quarzsand. Die Kratzspachtelung wurde ebenfalls nur bei einem Teil der Probekörper appliziert, da zum einen die Probekörper nur eine geringe Rautiefe von etwa 0,5 mm aufwiesen. Zum anderen sollte untersucht werden, ob die Adhäsion zwischen der elastischen Oberflächenschutzschicht (hwO) und dem Zink ohne zusätzliche Schichten ausreicht. Im folgenden Bild sind jeweils die Minimalaufbauten mit direktem Auftrag der hwO auf das Zink sowie die Maximalaufbauten mit Grundierung und Kratzspachtelung dargestellt.

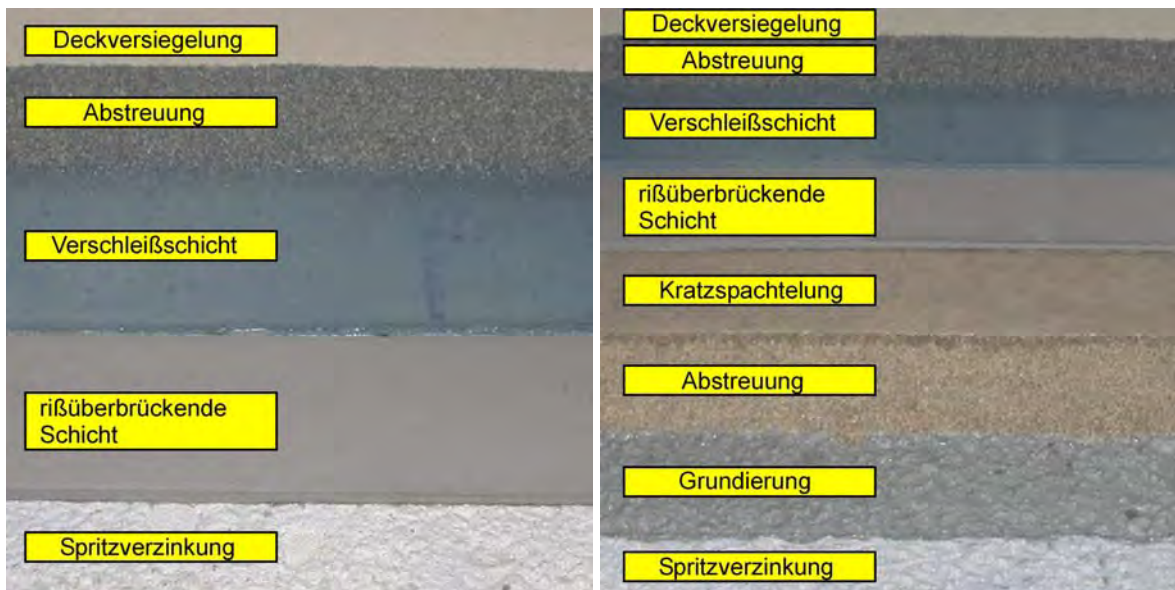


Bild 4.2-2: Schichtaufbauten der Systeme der Klasse OS-11a

Die rissüberbrückende Schicht sowie die Verschleißschicht bestehen in der Regel aus dem gleichen Polyurethan. In den vorangegangenen Darstellungen wurde die Verschleißschicht zur besseren Unterscheidung von der hwO blau pigmentiert.

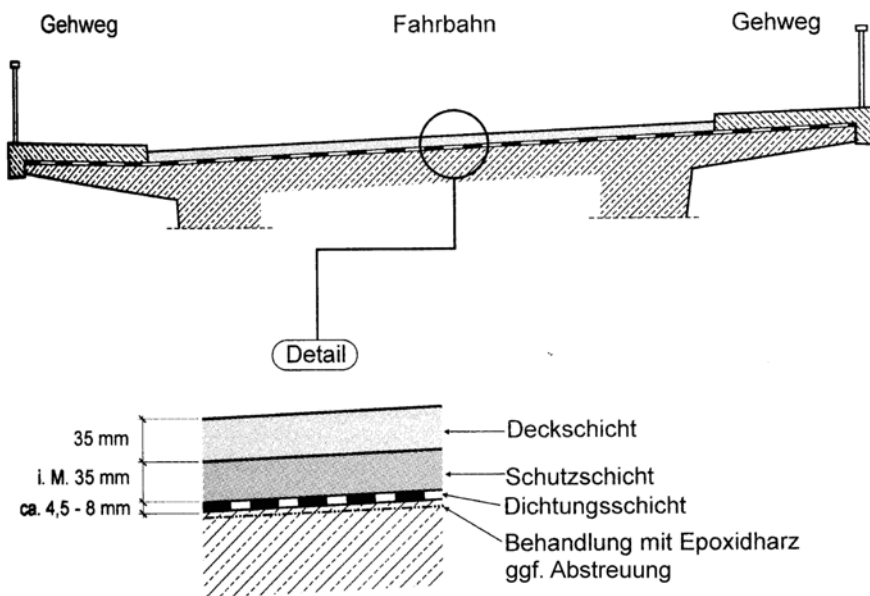
#### 4.2.3.3 OS-13

Das Oberflächenschutzsystem OS 13 wurde speziell für Zwischendecks von Parkhäusern entwickelt und weist im Gegensatz zu den Systemen der Klasse OS-11 nur eine statische Rissüberbrückungsfähigkeit von 0,1 mm bis zu einer Temperatur von  $-10\text{ °C}$  auf.

Da zum Zeitpunkt der Vorversuche nur ein grundgeprüftes System der Klasse OS-13 auf dem Markt verfügbar war, konnten in dieser Systemklasse keine Vergleichsuntersuchungen durchgeführt werden. Das eingesetzte System wurde entsprechend den Herstellerangaben mit und ohne Kratzspachtelung appliziert. Prinzipiell ist der Aufbau dieses Systems mit dem Aufbau des OS-11b vergleichbar. Sowohl die Funktion der rissüberbrückenden Schicht als auch der Verschleißschicht werden von der selben Schicht übernommen. Anschließend erfolgte wie bei den OS-11a-Systemen der Auftrag der Deckversiegelung.

#### 4.2.3.4 Systeme der ZTB-BEL-B, Teil 1

Diese Klasse von Beschichtungssystemen basierend auf dem Regelwerk ZTV-ING Teil 7 /13/, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, stellt in Deutschland die Regelabdichtung von Betonbrücken des Bundesfernstraßennetzes dar. Der Aufbau ist im folgenden Bild dargestellt.



**Bild 4.2-3:** Querschnitt einer Abdichtung auf einer Betonbrücke nach den Regeln der ZTV-ING Teil 7 aus /14/

Die Behandlung mit Epoxidharz geschieht dabei entweder einschichtig als abgestreute Grundierung oder zweischichtig als Versiegelung mit Abstreuerung der ersten Lage. Die Applikation der einzelnen Komponenten der Verbundabdichtung erfolgte nach den Regeln der TP-BEL-B Teil 1 /15/. Anschließend erfolgte die in den folgenden Kapiteln näher erläuterte Beanspruchung der Probekörper. Es wurden zwei verschiedene Epoxidharze in Verbindung mit einer für diese Produkte zugelassenen Bitumen-Schweißbahn gemäß der Zusammensetzung der geprüften Stoffe und Stoffsysteme der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) untersucht.

## 4.2.4 Künstliche Beanspruchung

### 4.2.4.1 Übersicht

Je nach basierendem Regelwerk und zugrundeliegender Systemklasse wurden unterschiedliche Arten der künstlichen Beanspruchung für die einzelnen Systeme durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind die Bewitterungsarten zusammengestellt, die Beschreibung der einzelnen Arten erfolgt in den darauffolgenden Kapiteln.

Tabelle 4.2-2: Übersicht der einzelnen künstlichen Bewitterungsarten

Systemklasse	Art der Beanspruchung	Kurzbeschreibung
1	2	3
OS-11a	Gewitterregen	Erwärmung der Probekörperoberfläche mit anschließender Beregnung
	Temperaturwechselbeanspruchung mit Tausalzeinfluss	Wechselagerung in warmem Wasser und in gesättigter NaCl-Lösung
OS-13	Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzeinfluss	Temperaturwechselbeanspruchung mit zwischenzeitlicher Flutung der Prüftruhe
ZTV-ING Teil 7	Wärmebeanspruchung	Erwärmung der Gussasphaltoberfläche mit anschließender Abkühlphase
	Temperatur-/Wasserwechselbeanspruchung	Temperaturwechselbeanspruchung mit zwischenzeitlicher Flutung der Prüftruhe

### 4.2.4.2 Gewitterregen

Die Gewitterregensimulation umfasst eine Aufwärmphase der Probekörper mit anschließender Beregnung. Der genaue Aufbau der Zyklen ist nachfolgend dargestellt:

- Warmlagerung: Temperatur  $T = (60 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ ; Dauer 5 h 45 min
- Beregnung mit Leitungswasser: Temperatur  $T = (12 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ ; Dauer 15 min
- Temperatur-Differenz: mind.  $(48 \pm 2) \text{ K}$

Dieser Zyklus wurde 10-mal wiederholt, so dass sich eine Gesamtdauer der Gewitterregensimulation von 60 Stunden ergibt. Die Anlage zur Durchführung der Gewitterregensimulation sowie der Wärmebeanspruchung der ZTV-ING-Systeme ist im folgenden Bild dargestellt.



Bild 4.2-4: Anlage zur Simulation des Gewitterregens sowie der Wärmebeanspruchung

#### **4.2.4.3 Temperaturwechselbeanspruchung mit Tausalzeinfluss**

Die Temperaturwechselbeanspruchung wird in einer Zweibeckenanlage durchgeführt. Dabei werden die Probekörper manuell zwischen zwei Becken umgelagert, die im Folgenden näher beschrieben sind:

- Becken 1: 2 h Lagerung in gesättigter Kochsalzlösung bei  $T = (-15 \pm 3) ^\circ\text{C}$ ,
- Becken 2: 2 h Wasserlagerung bei  $T = (20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ .

Während der Nacht lagerten die Probekörper an der Luft im Klima 23/50. Im folgenden Bild ist die Anlage zur Wechsellagerung dargestellt:



Bild 4.2-5: Zweibeckenanlage zur Durchführung der Temperaturwechselbeanspruchung

#### 4.2.4.4 Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzeinfluss

Die Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzeinfluss wurde in einer geschlossenen Prüfruhe mit programmierbarer Steuerung durchgeführt. Der eingesetzte Zyklus gemäß der Rili SIB ist im Folgenden näher beschrieben:

- 2 h Wasserlagerung bei  $T = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (einschließlich Entleeren innerhalb von maximal 15 min am Ende),
- 3 h Abkühlen mit Luft auf  $T = -(15 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (zulässige Abweichung vom linearen Temperaturverlauf zwischen  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\pm 3 \text{ K}$ ),
- 4 h Lagerung bei  $T = -(15 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- 0,25 h Erwärmen mit Wasser auf  $T = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (Fluten innerhalb von maximal 15 min am Ende),
- 1,5 h Aufheizen mit Luft auf  $T = (60 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (zulässige Abweichung vom linearen Temperaturverlauf zwischen  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\pm 3 \text{ K}$ ),
- 10 h Luftlagerung bei  $T = (60 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- 0,25 h Abkühlen mit Wasser auf  $T = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (Fluten innerhalb von maximal 15 min;  $62 \text{ }^\circ\text{C} > T > 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- 1,75 h Wasserlagerung bei  $T = (20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ .



Ein Zyklus dauert 24 Stunden. Die Temperaturwechselbeanspruchung umfasst 24 Zyklen.

#### **4.2.4.5 Wärmebeanspruchung**

Gemäß Kapitel 6.2 der TP-BEL-B Teil 1 wurden die Probekörper zunächst einer Wärmebeanspruchung unterzogen. Die Wärmebeanspruchung wurde mit der Anlage durchgeführt, die auch für die Gewitterregensimulation der OS-11a-Systeme verwendet wurde. Die Probekörper wurden dabei durch Wärmestrahler kontinuierlich über zwei Stunden auf eine Oberflächentemperatur des Gussasphalts unter den Strahlungskegeln von  $(70\pm 2)$  °C erwärmt. Zwischen den Strahlungskegeln soll die Temperatur  $(40\pm 2)$  °C betragen. Die Proben werden über eine Zeitschaltung 40 Bestrahlungszyklen ausgesetzt. Ein Zyklus besteht aus 6 Stunden Erwärmung und 6 Stunden Abkühlung.

#### **4.2.4.6 Temperatur-/Wasserwechselbeanspruchung**

Nach der Wärmebeanspruchung wurden die Verbundkörper Typ B einer kombinierten Temperaturwechsel-/Wasserbeanspruchung gemäß Kapitel 6.3 der TP-BEL-B Teil 1 ausgesetzt.

Die Beanspruchung bestand aus 20 Zyklen zu je 16,5 Stunden. Nach einer Vorlagerung der Proben über 24 Stunden in Wasser bei 20 °C wurden der im Folgenden dargestellte Zyklus gestartet:

- 3 h Abkühlung mit Luft von  $T = -(20\pm 2)$  °C,
- 4 h Lagerung bei  $T = -(20\pm 2)$  °C,
- 0,25 h Erwärmung mit Wasser von  $T = (20\pm 2)$  °C,
- 1,75 h Wasserlagerung bei  $T = (20\pm 2)$  °C,
- 1,5 h Aufheizen mit Luft auf  $T = (60\pm 2)$  °C,
- 4 h Luftlagerung bei  $T = (60\pm 2)$  °C,
- 0,25 h Abkühlen mit Wasser von  $T = (20\pm 2)$  °C,
- 1,75 h Wasserlagerung bei  $T = (20\pm 2)$  °C.

Nach Entnahme aus der Prüftruhe wurden die Probekörper bis zur Vorbereitung der Prüfung bei Laborklima 23/50 gelagert.

#### **4.2.4.7 Prüfung der Probekörper**

Die Prüfung der Probekörper durch Bestimmung der Haftzugfestigkeit an jeweils fünf Stellen eines jeden Probekörpers erfolgte direkt im Anschluss an die einzelnen Bewitterungsarten. Dazu wurde in jeden Probekörper an fünf Stellen nass eine Ringnut mit einem Durchmesser von 50 mm senkrecht zur Probekörperoberfläche gebohrt. Anschließend wurden Stahlstempel mit gleichem Durchmesser, einer Dicke von 30 mm und Innengewinde mittels eines Epoxidharzklebers auf die Probekörper geklebt. Mittels des Gewindes wurde die hydraulische Prüfmaschine angekoppelt. Bei den Gussasphaltsystemen wurden anstelle der runden Prüfstempel eckige Stempel mit einer Kantenlänge von 100 mm verwendet, da ein Einbohren der Ringnut bei Gussasphalt problematisch sein und zu Verfälschungen der Ergebnisse führen kann.

Je Prüfstelle wurde die Maximalkraft und über die Querschnittsfläche des Prüfstempels zudem die entsprechende Abreißfestigkeit bestimmt. Anschließend erfolgte die Auswertung des Bruchbildes hinsichtlich des Adhäsions- oder Kohäsionsversagens in den einzelnen Schichten des Oberflächenschutzsystems.

### **4.2.5 Darstellung der Ergebnisse**

#### **4.2.5.1 Haftzugfestigkeiten**

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der einzelnen untersuchten OS-Systeme getrennt nach Systemklasse dargestellt.

Die Bewertung des Bruchbildes hinsichtlich der Bruchflächenanteile erfolgt jeweils im zweiten Diagramm. Die einzelnen Schichten des Duplexsystems sind farbig gekennzeichnet und geben den Anteil des Versagens in der einzelnen Schicht entweder als Adhäsions- oder Kohäsionsversagen an. Bei den OS-11a-Systemen sind jeweils die drei Lagerungsbedingungen genannt, wobei entsprechend den Regelungen der Rili SIB mit  $T_{\text{Norm}}$  das Labor-klima 23/50 gemeint ist, mit  $T_{\text{Min}}$  das Klima 8/85, und mit „beansprucht“ sind die künstlich beanspruchten Probekörper gemeint.

Die Bezeichnung B bezeichnet Betonbruch, mit B/Z ist ein Adhäsionsversagen zwischen Beton und Zink gemeint und Z/G kennzeichnet Adhäsionsversagen zwischen Zink und je nach Aufbau der Grundierung, Kratzspachtelung oder der hwO.

Da die OS-13-Systeme nach künstlicher Bewitterung eine Blasenbildung gezeigt haben, konnte an diesen Probekörpern keine Haftzugprüfung durchgeführt werden. Die Problematik der Blasenbildung wird später noch genauer behandelt.



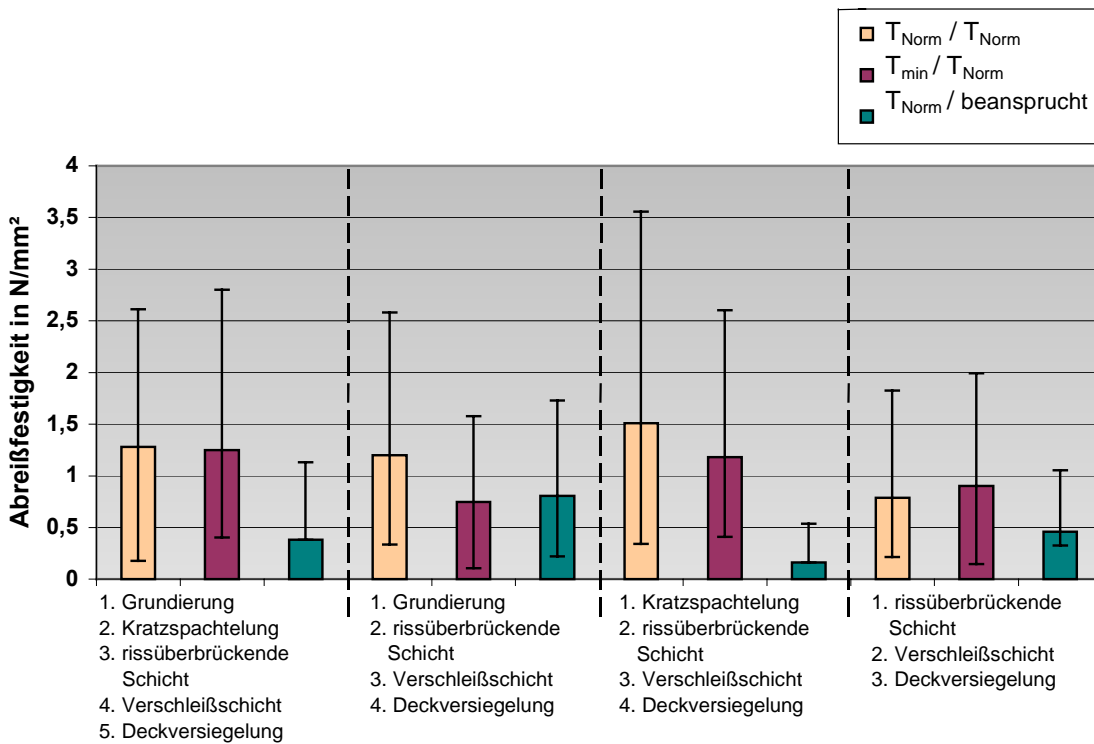


Bild 4.2-6: Abreißfestigkeiten des OS-11a-1-Systems

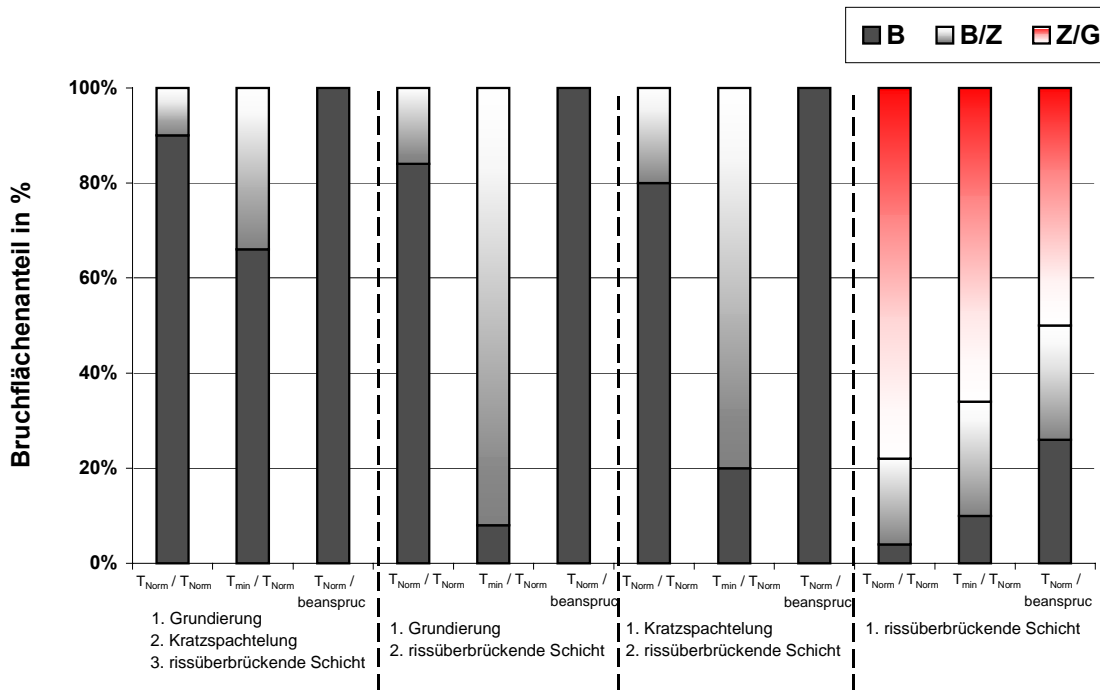


Bild 4.2-7: Auswertung der Bruchflächenanteile des OS-11a-1-Systems

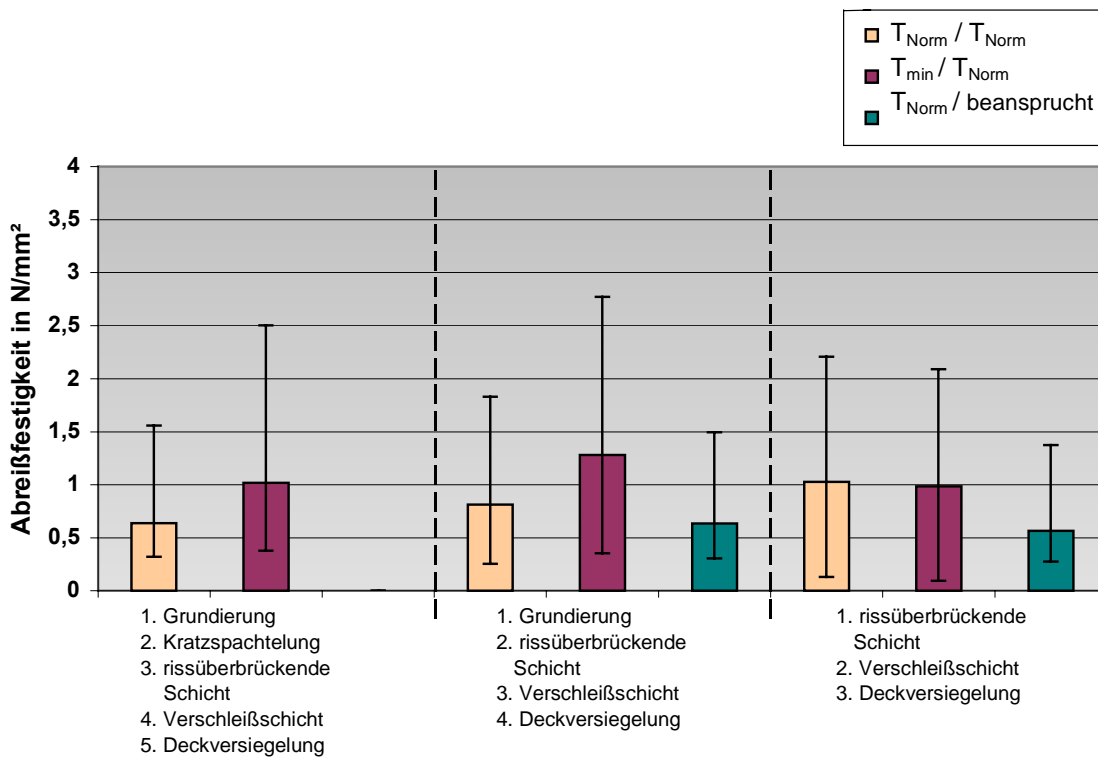


Bild 4.2-8: Abreißfestigkeiten des OS-11a-2-Systems

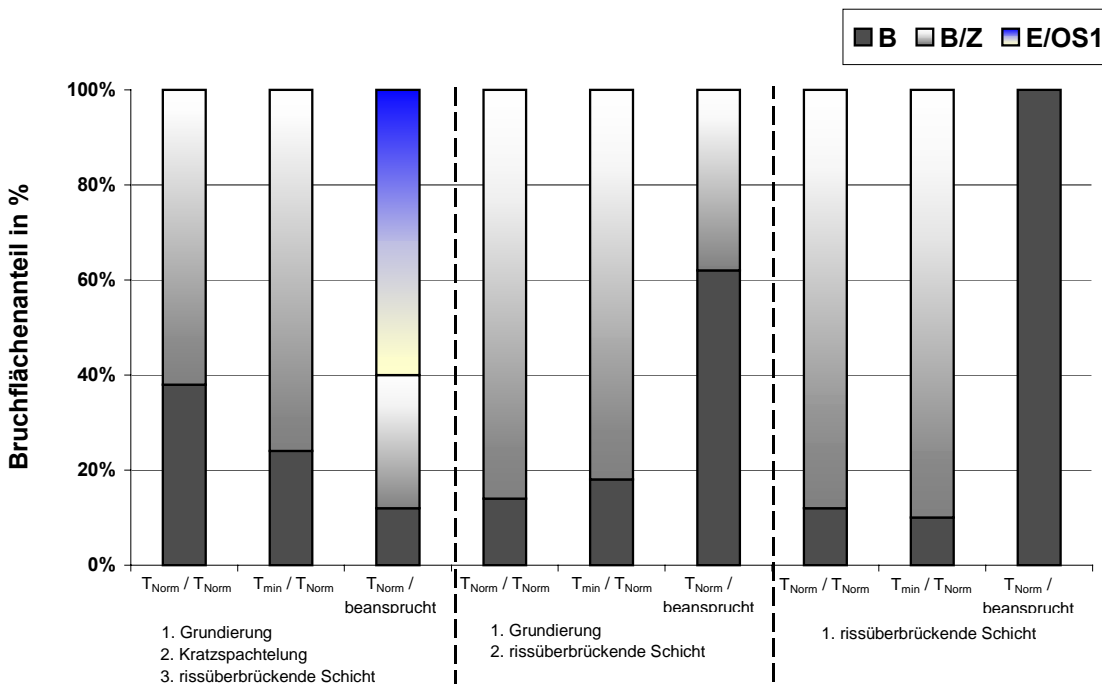


Bild 4.2-9: Auswertung der Bruchflächenanteile des OS-11a-2-Systems

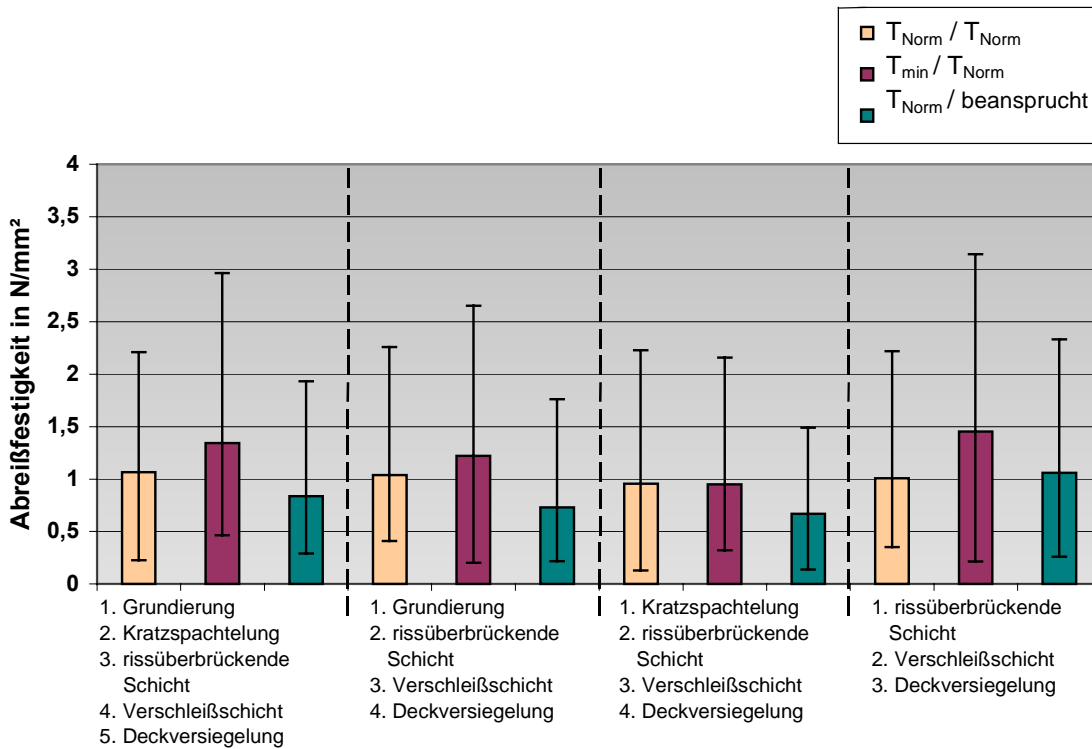


Bild 4.2-10: Abreißfestigkeiten des OS-11a-3-Systems

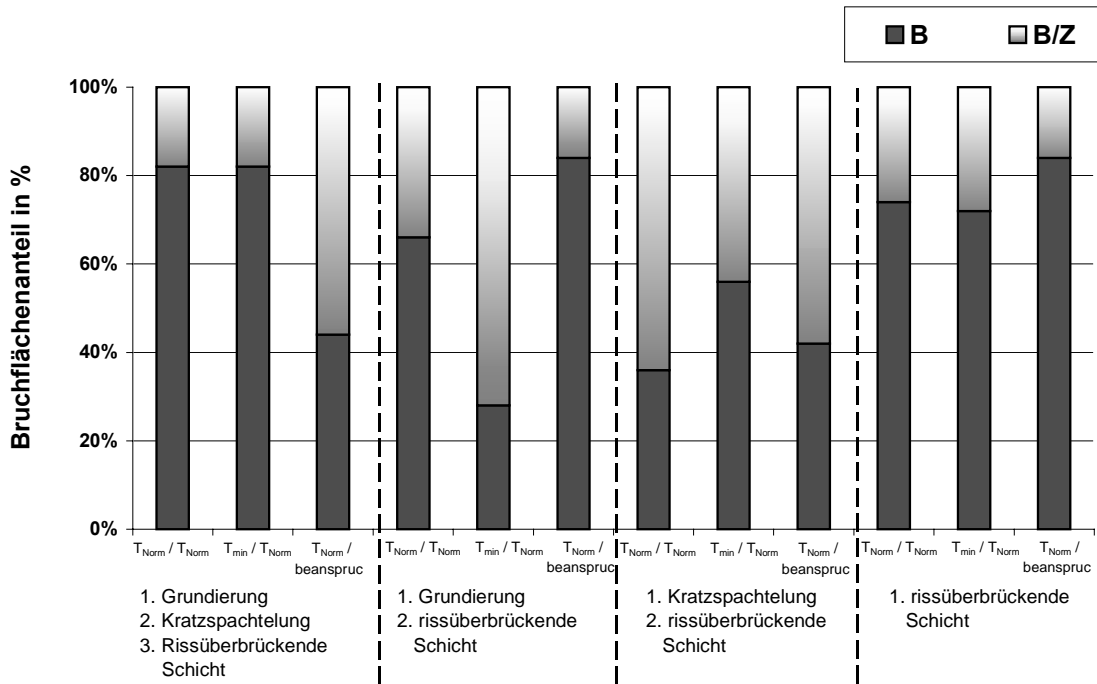


Bild 4.2-11: Auswertung der Bruchflächenanteile des OS-11a-3-Systems

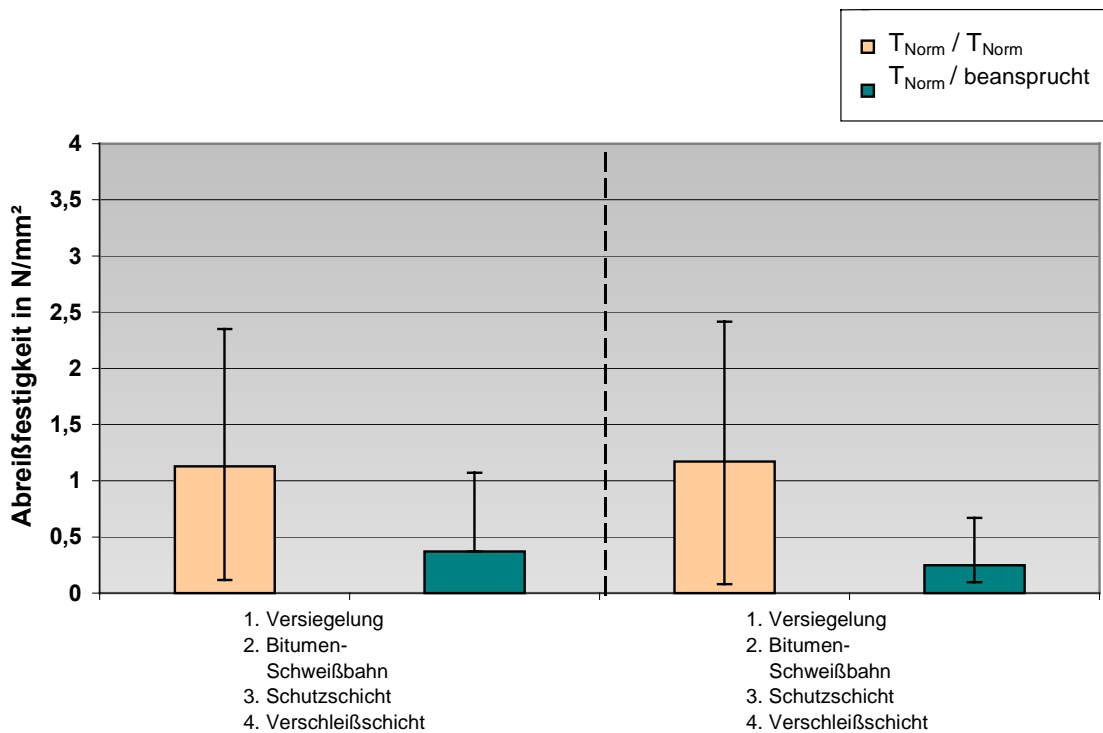


Bild 4.2-12: Abreißfestigkeiten der ZTV-Bel-B Teil 1 Systeme

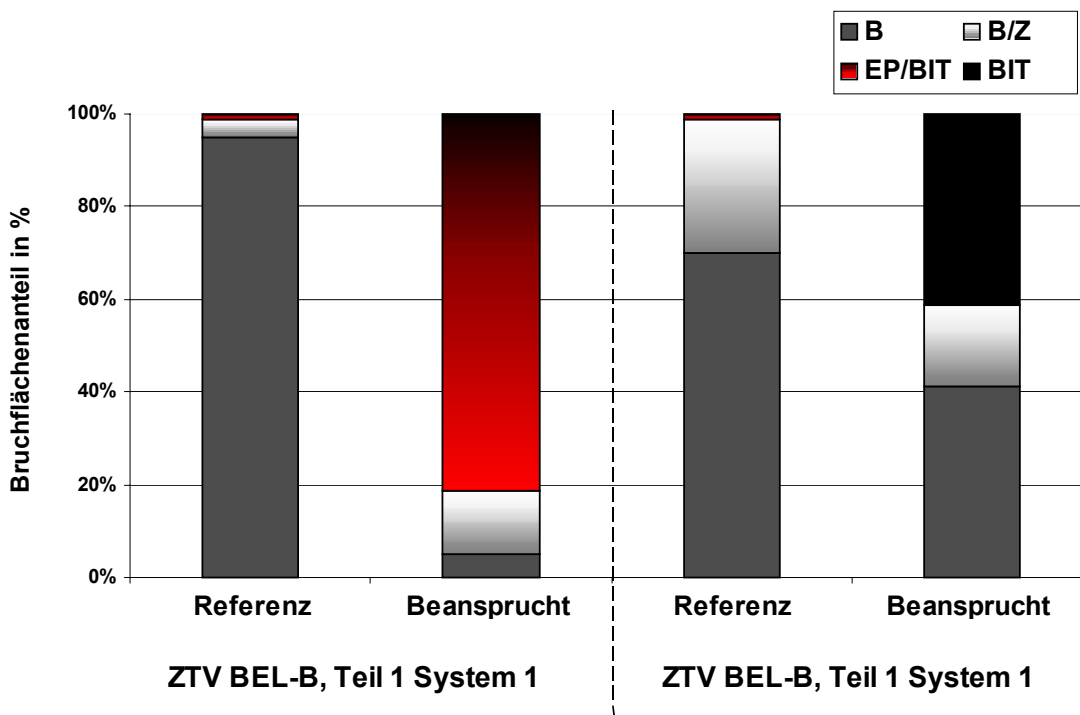


Bild 4.2-13: Verteilung der Bruchflächenanteile der ZTV-Bel-B Teil 1 Systeme

#### 4.2.5.2 Blasenbildung bei den mit OS-13 beschichteten Platten

Die beiden bewitterten Platten des OS-13-Systems zeigten unmittelbar nach Beendigung der Bewitterung eine deutliche Blasenbildung, die im Fall der mit der zusätzlichen Kratzspachtelung versehenen Platte nahezu die gesamte Oberfläche umfasste. Die Ablösung erfolgte in beiden Fällen direkt oberhalb der Spritzverzinkung. Nahezu die gesamte Grundierung hat sich vom Zinkuntergrund gelöst. Die Blasen waren luftgefüllt und standen unter Druck. Nach Öffnen der Blasen erschien die Betonoberfläche matt, Hinweise auf eine komplette Durchfeuchtung wurden nicht gefunden.

In den folgenden zwei Bildern sind die Blasen auf den beiden bewitterten Probekörpern dargestellt.



Bild 4.2-14: Blasenbildung mit großflächiger Enthftung bei den mit OS 13 beschichteten Betonplatten nach künstlicher Bewitterung

Da die OS-13-Systeme entgegen den OS-11a-Systemen bei der künstlichen Bewitterung dauerhaft einer direkten Wasserlagerung oder Feuchtlagerung und nicht nur einer Beregnung ausgesetzt worden waren, waren diese Probekörper vermutlich deutlich feuchter als die entsprechenden OS-11a-Systeme.

Eine Blasenentstehung bei den OS-11a-Systemen oder den Systemen nach ZTV ING kann somit bei vergleichbarer Wassersättigung nicht ausgeschlossen werden.

Weitere Untersuchungen zur Blasenentstehung finden sich in Kapitel 4.3.

#### **4.2.5.3 Bewertung der Haftzugfestigkeiten und Auswahl eines geeigneten Oberflächenschutzsystems für die weiteren Untersuchungen des ibac und der BAM**

Aufgrund der Exposition des für die weiteren Untersuchungen des ibac vorgesehenen Parkdecks als Freideck kamen nur die OS-11a-Systeme in Frage. Ein OS-13-System ist wegen der begrenzten Rissüberbrückungsfähigkeit nicht in der Lage, in Freidecks üblicherweise auftretende Rissbewegungen dauerhaft zu überbrücken. Zudem konnte das untersuchte OS-13-System infolge der beschriebenen Blasenbildung im Hinblick auf eine ausreichende Haftzugfestigkeit nicht untersucht werden. Die ZTV-BEL-B-Systeme ermöglichen aufgrund der nahezu dampfdichten Eigenschaften kein nennenswertes Austrocknen des Betons.

Ein Vergleich der untersuchten Systemaufbauten hinsichtlich Grundierung und Kratzspachtelung zeigt bei direktem Auftrag der rissüberbrückenden Schwimmschicht in der Mehrzahl der Fälle nur vergleichsweise geringe Abreißfestigkeiten, die sich nach der Bewitterung nur geringfügig verändern. Der Auftrag einer Grundierung ist somit auch bei vorherigem Auftrag der Spritzverzinkung erforderlich.

Bei Auftrag einer Grundierung verschiebt sich die Versagensebene in die Kontaktzone Beton-Zink, wobei die Abreißfestigkeiten sowohl ohne als auch mit Bewitterung in einem sehr großen Bereich variieren. Dies ist allerdings unter anderem mit der Bewitterung des chloridhaltigen Betons durch 50 Frost-Tauwechsel zu begründen, die zu einer geringen Schädigung des Betongefüges geführt haben. Auf den Einsatz eines bei Frost-Tausalzbeanspruchung üblicherweise vorgesehenen LP-Bildners zur Erhöhung des Frost-Tausalzstandes wurde allerdings verzichtet, da LP-Bildner zu Problemen bei einer anschließend aufgetragenen Beschichtung führen können und somit die Bewertung der Haftzugergebnisse erschwert hätten. Zudem sollte zur Vergleichszwecken die mit den Untersuchungen der BAM identische Betonzusammensetzung verwendet werden.

Die beiden Systeme OS-11a-1 und OS-11a-3 zeigen vergleichbare Haftzugergebnisse. Das System OS-11a-3 zeigt allerdings in nahezu allen Fällen Mittelwerte von rund 1,0 N/mm<sup>2</sup> und darüber. Aus diesem Grund wurde dieses System für die weiteren Untersuchungen des ibac und der BAM ausgewählt. Es wurde dabei der nachfolgend dargestellte Systemaufbau gewählt:

- Spritzverzinkung,
- Grundierung,
- Kratzspachtelung (je nach Rauhtiefe),
- Rissüberbrückende Schwimmschicht,
- Verschleißschicht,
- Deckversiegelung.

Der komplette Aufbau ist im folgenden Bild dargestellt.

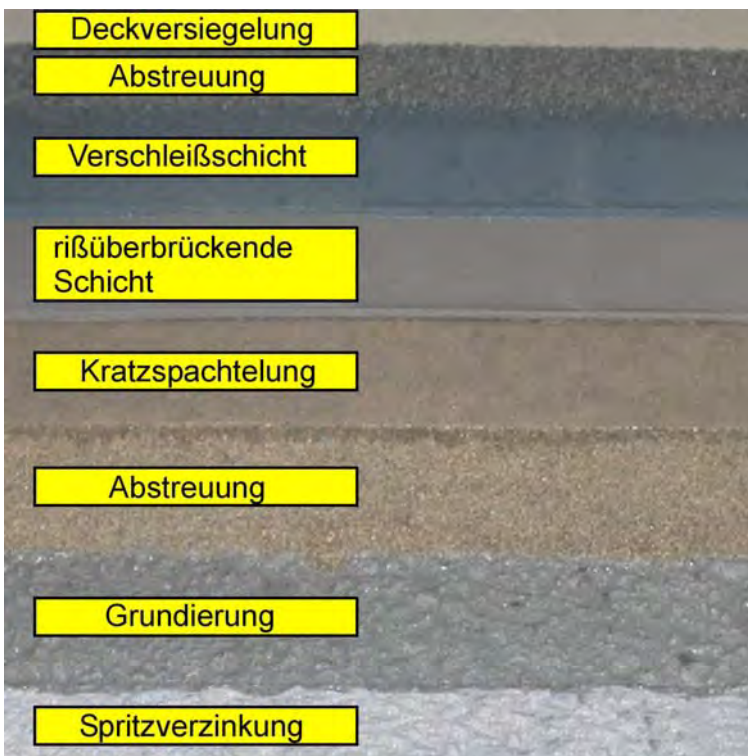


Bild 4.2-15: Ausgewählter Aufbau des OS-11a-3-Systems für die weiteren Untersuchungen des ibac und der BAM



Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sind sowohl OS-11a-Systeme als auch nach ZTB-ING Teil 7 aufgebaute Gussasphaltsysteme im Hinblick auf eine ausreichende Haftzugfestigkeit als geeignet für den Auftrag auf spritzverzinktem Beton zu sehen. Inwieweit sich diese Haftzugwerte mit der Zeit infolge der Korrosion des Zinks und der dabei entstehenden Korrosionsprodukte in der Kontaktzone Beton – Zink verändern, kann auf Basis der vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht gesagt werden. Ergebnisse hierzu finden sich in den Untersuchungen der MPA Stuttgart.

#### 4.2.5.4 Untersuchung der Kontaktzone Beton – Zink

Zur Untersuchung der Kontaktzone Beton – Zink sowie der Bestimmung der Tiefenausdehnung der Spritzzinkschicht auf der Betonoberfläche wurden aus Prüfstempeln der Haftzuguntersuchungen Dünnschliffe angefertigt und anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop REM untersucht. Vor dem Schleifen der Schliffe wurden die Probekörper im Vakuumverfahren mit Epoxidharz getränkt. Die Schichtdicke der gefertigten Dünnschliffe betrug etwa 50 µm bis 80 µm. Im folgenden Bild ist exemplarisch ein untersuchter Dünnschliff dargestellt.

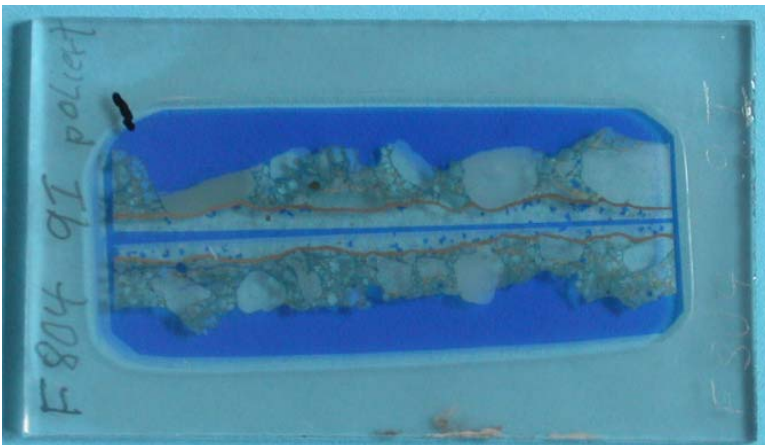


Bild 4.2-16: Dünnschliffe zur lichtmikroskopischen Untersuchung und zur Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop



In den folgenden zwei Bildern sind jeweils die REM-Aufnahmen als auch das entsprechende Mapping für Zink (grün) sowie Natrium (rot) dargestellt. Da in der EDX-Analyse die Peaks von Zink und Natrium relativ nahe beieinander liegen, kann ein alleiniges Zink-Mapping durch die Überlagerung mit dem durch Natrium hervorgerufenen Peak verfälscht werden. Betrachtet man jedoch beide Mappings im Vergleich, so ist der Nachweis des Zinks in den Bereichen mit Sicherheit möglich, wo sowohl ein Kaliumsignal als auch ein Zinksignal vorhanden sind.

In Bild 4.2-17 ist die Kontaktzone zwischen Beton und Zink dargestellt. Bild 4.2-18 zeigt die Untersuchung von Poren im Beton in einer Tiefe von etwa 20 bis 30  $\mu\text{m}$  unterhalb der Kontaktzone Beton/Zink.

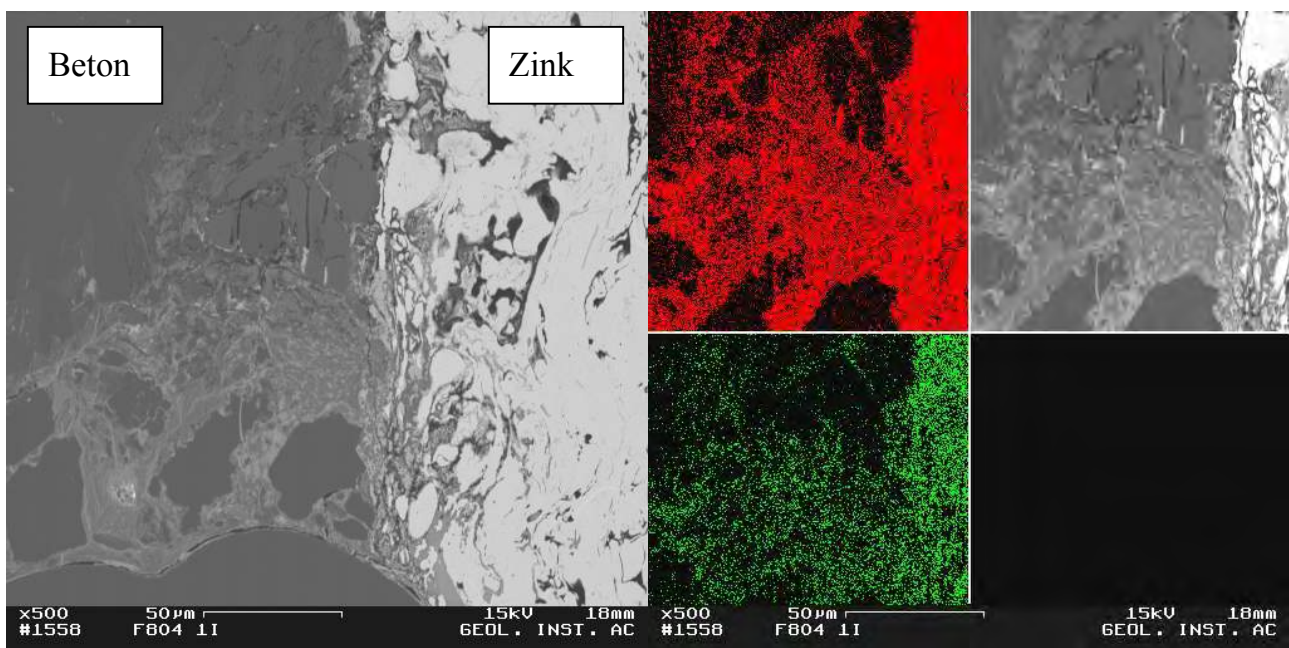


Bild 4.2-17: REM-Bild der Kontaktzone Beton – Zink (links) und EDX - Mapping der Zinkverteilung (rechts)

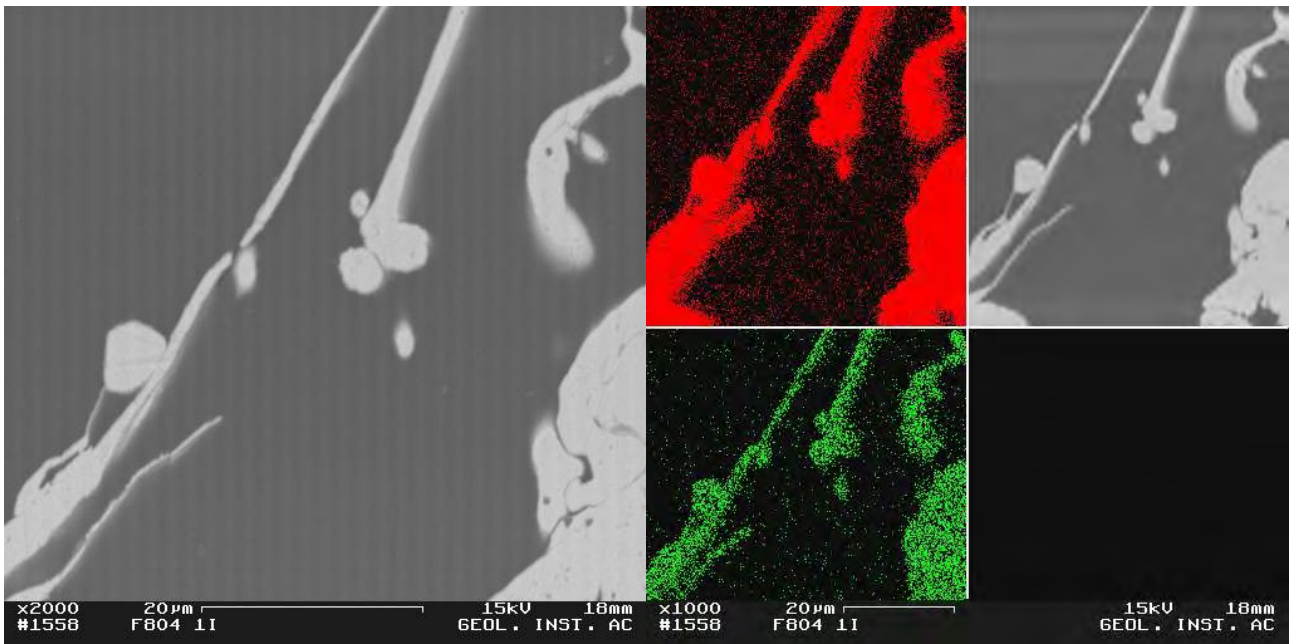


Bild 4.2-18: REM-Bild der Kontaktzone Beton – Zink (links) und EDX - Mapping der Zinkverteilung (rechts)

In beiden Bildern ist ein Eindringen des Zinks in das oberflächliche Porensystem des Betons erkennbar. Dieser Transport ist möglicherweise durch Transportprozesse der infolge der Eigenkorrosion des Zinks gelösten Zinkionen im Kapillarporensystem des Betons hervorgerufen worden. Ein derart tiefes Eindringen des Zinks unmittelbar bei oder nach Aufspritzen des Zinks in den oberflächlich trockenen Beton erscheint dagegen nicht wahrscheinlich.

Weitere Untersuchungen der Kontaktzone Beton/Zink mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden von der MPA Stuttgart durchgeführt (siehe Kapitel 4.4.)

### 4.3 Laboruntersuchungen zum Kathodischen Korrosionsschutz (BAM)

#### 4.3.1 Herstellung der Stahlbetonprobekörper, Betonrezeptur und Frischbetonkennwerte

Gemäß den Vorgaben des Forschungsantrags wurden zwei Betonserien mit insgesamt 60 Probekörpern der Abmessung (B · T · H) 30 cm · 30 cm · 20 cm und unterschiedlichen Betonrezepturen hergestellt. Hierbei wurden die Betonfestigkeitsklassen bzw. die Wasser-Bindemittelwerte (w/b-Werte) variiert.

Die Probekörper wurden mit 3 bzw. 6 Stäben ( $d = 10 \text{ mm}$ ) im Abstand von 75 mm bzw. 40 mm bewehrt. Es wurden zum Teil drei Vergleichsproben mit unterschiedlichen Chloridgehalten (1 %; 2,5 % und 4 %), bezogen auf das Zementgewicht, und unterschiedlichen Betondeckungen (10 mm und 40 mm) hergestellt.

Ein Probekörper jeder Serie wurde ohne Chloride als Referenzprobe hergestellt. Tabelle 4.3-1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Probekörper.

Tabelle 4.3-1: Übersicht über die Anzahl der verschiedenen Probekörper

Serie	w/b-Wert	Chloridgehalt	Stäbe	Betondeckung	mit MRE	ohne Beschichtung	mit Zink	mit Zink + Oberflächenschutz
-	-	M.-%	-	mm	-	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,7	0	3	10	-	1	-	-
			3	10	X	1	-	1
		1,0	3	10	-	-	1	2
			3	40	-	1	1	3
		2,5	3	10	X	1	-	1
			3	10	-	-	1	3
			3	40	-	1	1	2
		4,0	3	10	-	1	1	3
			6	10	-	1	-	3
		2	0,55	0	3	10	-	1
3	10				X	1	-	1
1,0	3			10	-	-	1	2
	3			40	-	1	1	3
2,5	3			10	X	1	-	1
	3			10	-	-	1	3
	3			40	-	1	1	2
4,0	3			10	-	1	1	3
	6			10	-	1	-	3

Die Betonrezepturen wurden nach den Vorgaben der DIN 1045-1 entwickelt und hergestellt, die wesentlichen Werte der beiden Serien sind in Tabelle 4.3-2 dargestellt.

Tabelle 4.3-2: Betonrezeptur

Parameter	Serie 1	Serie 2
1	2	3
Festigkeitsklasse	B 15	B 35
w/b-Wert	0,70	0,55
Zementgehalt [kg/ m <sup>3</sup> ]	257	327
Zementart	CEM I 32,5 R	
Sieblinie	A/B 16	

Während der Betonherstellung ergaben sich für die Serien 1 und 2 die in Tabelle 4.3-3 angegebenen Frischbetonkennwerte.

Tabelle 4.3-3: Frischbetonkennwerte

Parameter	Einheit	Serie 1	Serie 2
1	2	3	4
Ausbreitmaß	cm	49	50
Luftporengehalt	%	0,60	0,67
Frischbetonrohddichte	kg/dm <sup>3</sup>	2,38	2,38

Zur Kennzeichnung der Proben dient eine dreistellige Probennummer und eine Kurzbezeichnung, welche die wichtigsten Parameter der jeweiligen Probe beschreibt. Die Kurzbezeichnung setzt sich wie folgt zusammen:

*Anzahl Bew.-Stäbe (3 o. 6)/Betondeckung [mm]/ Chloridgehalt [%]/Oberflächenschutz (Zn, OS, ohne)*

## 4.3.2 Installation der Sensoren und der Messwerterfassung

### 4.3.2.1 Multiring-Elektroden (MRE)

Zur Erfassung der Feuchtigkeitsverteilung wurde in acht ausgewählten Probekörpern je eine Multiring-Elektrode (MRE) eingebaut. Mit der MRE ist es möglich, die Widerstände im Beton abhängig von der Tiefe zu bestimmen. Da Widerstand und Feuchtigkeit in einem direkten Zusammenhang zueinander stehen, lässt sich von den Widerstandswerten auf die Feuchtigkeitsverteilung schließen. In Bild 4.3-1 ist eine ausgebaute MRE dargestellt.



Bild 4.3-1: ausgebaute MRE (Fa. Sensortec)

Die MRE waren in den Probekörpern sehr dicht unter der Oberfläche angebracht. Es ließen sich somit die Widerstandswerte in Tiefen von 0,5 bis 4,0 cm mit einer Auflösung von 0,5 cm ermitteln. Mit Hilfe einer rechnergestützten automatischen Messwerterfassung wurden die Widerstandswerte fortlaufend aufgezeichnet.

#### **4.3.2.2 Mangandioxid-Elektroden (MnO<sub>2</sub>-Elektroden)**

Entsprechend dem Stand der Technik ist zur Sicherstellung eines ausreichenden kathodischen Korrosionsschutzes die Erfüllung verschiedener Schutzkriterien erforderlich /16, 17, 18/. Hierzu gehört die Absenkung des Korrosionspotentials auf ein Schutzpotential im Bereich um  $-400$  mV [NHE], die Erreichung von Schutzstromdichten im Bereich um  $10$  mA/m<sup>2</sup>, sowie ein Potentialanstieg von mehr als  $100$  mV innerhalb von 4 bzw. 24 Stunden nach Abschaltung des Schutzstromes. Zur Überprüfung der Schutzkriterien wurde in jedem Probekörper eine MnO<sub>2</sub>-Elektrode eingebaut. Das Bezugspotential dieser Elektrode liegt bei  $+410$  mV gegen die Normalwasserstoffelektrode. Mit der internen MnO<sub>2</sub>-Elektrode ist es möglich, das Potential der Bewehrung mit einem geringen ohmschen Spannungsabfall zu messen. Die Befestigung erfolgte parallel zu einem mittig liegenden Bewehrungsstab. In Bild 4.3-2 ist eine ausgebaute MnO<sub>2</sub>-Elektrode zu sehen.



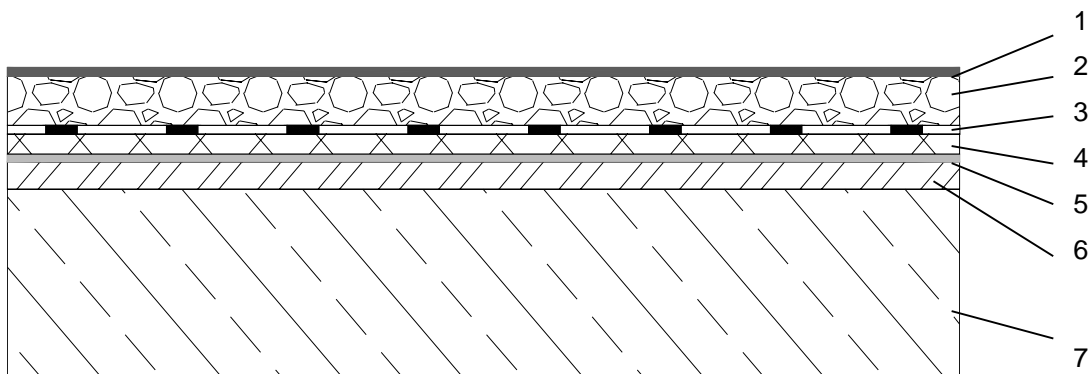


Bild 4.3-2: ausgebaute MnO<sub>2</sub>-Elektrode (Fa. Force, DK)

### **4.3.3 Applikation der Zinkspritzschicht und des Oberflächenschutzsystems**

Nach 1-jähriger Auslagerung der Probekörper wurde eine Anschlussklemme aufgeklebt, die zu beschichtende Oberfläche mit Granulat gestrahlt und anschließend mit Pressluft abgeblasen. Daraufhin erfolgte die Applikation der Zinkschicht bei der Grillo-Werke AG nach dem bereits unter Kapitel 4.2.2 beschriebenen Verfahren.

Um die Probekörper vor Niederschlag zu schützen und eine Austrocknung hervorzurufen, wurde ein Oberflächenschutzsystem der Klasse OS 11 nach Richtlinie des DAfStb aufgebracht. Dieses Schutzsystem kommt hauptsächlich bei befahrenen Flächen (Parkdecks) und Brückenkappen zur Anwendung. Hier soll es die Wasseraufnahme und die Chlorideindringung verhindern, sowie den Frosttausalz widerstand erhöhen. Bild 4.3-3 zeigt den Schichtenaufbau des Oberflächenschutzsystems der Probekörper.



- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1 Deckversiegelung:            | PU; 500 – 700 g/m <sup>2</sup>  |
| 2 Verschleißfeste Deckschicht: | PU+ Quarzsand; 1100 g/m <sup>2</sup><br>(mit Sand abgestreut; 5 kg/m <sup>2</sup> ) |
| 3 Elastische Schutzschicht:    | PU; 1700 g/m <sup>2</sup>   |
| 4 Kratzspachtelung:            | EP; Quarzsand; 1200 g/m <sup>2</sup>  |
| 5 Grundierung:                 | EP; 300 g/m <sup>2</sup>  |
| 6 Spritzzinkschicht:           | Schichtdicke 250 µm   |
| 7 Stahlbetonprobekörper:       |   |

**Bild 4.3-3:** Aufbau des Oberflächenschutzsystems

Unabhängig vom OS wurden alle Seitenflächen der Probekörper mit Epoxidharz beschichtet. Es ist somit sichergestellt, dass etwaiger Feuchtigkeitszutritt und die Austrocknung im wesentlichen von der Ober- bzw. Unterseite erfolgen kann. Der Probekörper kann daher als eine herausgelöste Teilfläche z. B. einer Parkhausdecke betrachtet werden.

In der Bild 4.3-4 sind verschiedene Phasen der Oberflächenbeschichtung zu sehen. Sie zeigen die Grundierung und die Kratzspachtelung. Nach dem Abstreuen der verschleißfesten Deckschicht wird die Deckversiegelung aufgebracht.



**Bild 4.3-4:** Aufbringung des Oberflächenschutzsystems; links: Grundierung und Kratzspachtelung, rechts: Deckversiegelung

#### 4.3.4 Auslagerung und Messungen an den Probekörpern

Nach ihrer Herstellung wurden die Probekörper im Juni 2001 auf einer Freifläche auf dem Gelände der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ausgelagert. Der Teil der Proben, der mit MRE ausgestattet war, wurde auf dem Dach des Hauses 1 der BAM gelagert, um die automatische Messwerterfassung durchführen zu können.

Anfang Juni 2002 wurden die Proben, die mit Zink beschichtet werden sollten, auf Paletten verpackt und zur Herstellung der Beschichtung versendet. Nach der Beschichtung und dem Rücktransport wurde Anfang August 2002 an ausgewählten Probekörpern das Oberflächenschutzsystem OS-11 aufgebracht. Die Proben wurden anschließend auf dem Dach des Hauses 1 der BAM gelagert (Bild 4.3-5).



Bild 4.3-5: Auslagerung der Probekörper auf einer Dachfläche, BAM, Berlin

Nach Kontaktierung von Bewehrungsstahl und Zinkschicht wurden das Mischpotential (Schutzpotential) und der Schutzstrom gemessen. Die Messung der Schutzströme erfolgte über einen 10  $\Omega$ -Messwiderstand. Schutzströme und -potentiale sowie die Einhaltung des 100-mV-Kriteriums wurden an allen Versuchsblöcken in Abständen von ca. 4 Wochen gemessen. Parallel dazu konnte mit Hilfe von zwei Data-Loggern (Hydra Serie II, Fa. Fluke und Agilent 34970A, Fa. Agilent Technologies) das Schutzpotential und der Schutzstrom im Abstand von sechs Stunden aufgezeichnet werden. Die Speicher dieser Geräte wurden etwa alle vier Wochen ausgelesen und mit den Handmessungen verglichen.



Über die eingebauten Multiring-Elektroden mit automatischer Messwerterfassung wurde die Feuchteverteilung der Probekörper online aufgezeichnet. Die Speicherung der gemessenen Widerstände erfolgte ebenfalls in einem Abstand von 6 Stunden.

Zur Abschätzung des Korrosionszustandes der Bewehrung wurden galvanostatische Pulsmessungen durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird ein Prüfkopf mit einer Ag/AgCl-Elektrode und einer Gegenelektrode auf die Oberfläche des Probekörpers aufgesetzt. Anschließend erfolgt eine Potentialmessung vor und während eines galvanostatischen Strompulses (Bild 4.3-6).

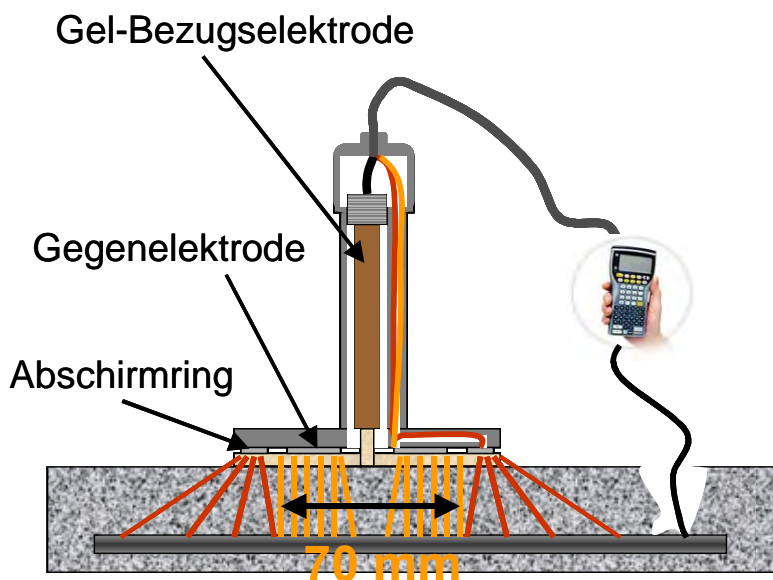


Bild 4.3-6: Prinzipdarstellung der galvanostatischen Pulsmessungen

Aus der Polarisierbarkeit der Bewehrung unterhalb des Prüfkopfes können Rückschlüsse auf den aktuellen Korrosionszustand abgeleitet werden. Die Anwendung dieser Methode ist jedoch nur bei unbeschichteten Probekörpern möglich, da das Oberflächenschutzsystem eine Isolierung zwischen Elektrode und Beton darstellt. Diese Messungen kamen daher hauptsächlich vor dem Beschichten der Probekörper zum Einsatz. Hier dienten sie zur Abschätzung der Vorkorrosion während der Freibewitterung. Anschließend wurden die Pulsmessungen an den unbeschichteten Vergleichskörpern weitergeführt. Die gleichzeitig ermittelten Potentialwerte konnten für einen Vergleich mit den Potentialmessungen gegen die interne  $\text{MnO}_2$ -Elektrode herangezogen werden.

### 4.3.5 Ergebnisse

#### 4.3.5.1 Ergebnisse der Potential- und Strommessungen

Die von August 2001 bis Anfang Juni 2002 an diesen Probekörpern durchgeführten Messungen dienten hauptsächlich zur Ermittlung des Verlaufs der „Vorkorrosion“. Hierzu wurden Potentialmessungen und galvanostatische Pulsmessungen im Abstand von ca. 4 Wochen an allen Probekörpern durchgeführt. In Tabelle 4.3-4 sind exemplarisch die Messergebnisse ca. 8 Wochen nach Herstellung der Probekörper am 03.08.2001 und die Messergebnisse vom 15.11.2002 aufgeführt.

Tabelle 4.3-4: Messergebnisse der galvanostatischen Pulsmessung

Prüfkörper Nr.	August 2001			November 2002		
	Potential Ag/AgCl	Strom- dichte	Wider- stand	Potential Ag/AgCl	Strom- dichte	Wider- stand
-	mV	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	k $\Omega$	mV	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	k $\Omega$
1	2	3	4	5	6	7
<b>Serie 1: w/z 0,7</b>						
121 6/10/4%/ohne	-458	1,02	0,4	-398	5,21	1,1
123 3/10/4%/ohne	-467	0,52	0,6	-432	3,87	1,1
136 3/10/2,5%/ohne	-427	0,55	0,8	-382	2,38	1,5
145 3/40/1%/ohne	-463	0,82	0,8	-210	0,72	2,4
146 3/40/2,5%/ohne	-348	0,45	1,3	-352	1,77	1,6
155 3/10/0%/ohne	-78	0,20	2,0	-95	0,30	2,2
156 3/10/1%/ohne	-288	1,91	1,0	-182	1,95	2,3
<b>Serie 2: w/z 0,55</b>						
221 6/10/4%/ohne	-502	0,88	0,40	-464	5,47	0,8
223 3/10/4%/ohne	-475	2,28	0,40	-428	5,67	1,1
236 3/10/2,5%/ohne	-505	0,45	0,70	-388	2,82	1,8
245 3/40/1%/ohne	-449	0,52	1,20	-203	1,20	2,5
246 3/40/2,5%/ohne	-473	0,64	0,90	-339	2,58	1,9
255 3/10/0%/ohne	-119	0,09	1,00	-88	0,18	3,2
256 3/10/1%/ohne	-337	0,39	1,10	-276	1,66	2,2

Die Potentialwerte zeigen bereits zum Start der Messungen an allen mit Chloriden versetzten Probekörpern ein Korrosionspotential im aktiven Bereich an. Im weiteren Verlauf steigen die Potentialwerte um bis zu 100 mV an. Bei den ermittelten Korrosionsstromdichten wurden kurze Zeit nach der Herstellung der Proben noch relativ geringe Werte ermittelt. Im Verlauf der weiteren Messungen stiegen diese dann insbesondere bei den Proben mit 4 % Chlorid deutlich an.

Den Beginn der Versuche zum kathodischen Korrosionsschutz stellt die Kontaktierung der Zinkschicht mit der Bewehrung der Probekörper am 30. August 2002 dar. Ab diesem Zeitpunkt wurden die relevanten elektrochemischen Parameter zur Ermittlung der Schutzparameter erfasst.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Schutzpotentiale und –ströme zu Beginn und Ende des Versuchszeitraums aufgeführt. Aus diesen Tabellen werden eindeutige Trends deutlich: die Schutzpotentiale liegen nach 16 Monaten um ca. 50 bis 100 mV positiver. Die Höhe der Schutzströme erreicht zum Ende nur noch Werte zwischen 10 und 50 % der Anfangsströme.

Tabelle 4.3-5: Schutzpotential und Schutzstrom (Serie 1: w/b 0,7)

Probekörper Nr.	30.08.2002		02.12.2003	
	Potential MnO <sub>2</sub>	Strom	Potential MnO <sub>2</sub>	Strom
-	mV	µA	mV	µA
1	2	3	4	5
111 3/10/1%/OS	-430	20	-389	10
112 3/10/1%/OS	-446	10	-407	10
113 3/10/1%/Zn	-525	260	-461	90
114 3/10/1%/OS	-471	90	-420	40
115 6/10/4%/OS	-603	820	-534	260
116 6/10/4%/OS	-617	1480	-537	300
121 6/10/4%/ohne	-565	-	-654	-
122 6/10/4%/OS	-596	1600	-504	220
123 3/10/4%/ohne	-541	-	-644	-
124 3/10/4%/OS	-634	1060	-536	220
125 3/10/4%/OS	-624	1470	-503	250
126 3/10/4%/OS	-610	1090	-528	270
131 3/10/2,5%/OS	-535	110	-448	80
132 3/10/2,5%/OS	-505	60	-446	70
133 3/10/2,5%/Zn	-607	1280	-518	140
134 3/10/2,5%/OS	-612	520	-482	80
135 3/10/4%/Zn	-674	3560	-578	360
136 3/10/2,5%/ohne	-545	-	-620	-
141 3/40/2,5%/OS	-574	320	-463	110
142 3/40/2,5%/OS	-536	180	-464	90
143 3/40/2,5%/Zn	-672	1690	-476	117
144 3/40/2,5%/OS	-564	260	-475	60
145 3/40/1%/ohne	-442	-	-350	-
146 3/40/2,5%/ohne	-513	-	-321	-
151 3/40/1%/OS	-398	10	-402	20
152 3/40/1%/OS	-396	10	-329	10
153 3/40/1%/OS	-447	10	-388	20
154 3/40/1%/Zn	-526	410	-478	110
155 3/10/0%/ohne	-330	-	-258	-
156 3/10/1%/ohne	-396	-	-330	-

Tabelle 4.3-6: Schutzpotential und Schutzstrom (Serie 2: w/z 0,55)

Probekörper Nr.	30.08.2002		02.12.2003	
	Potential MnO <sub>2</sub>	Strom	Potential MnO <sub>2</sub>	Strom
-	mV	µA	mV	µA
1	2	3	4	5
212 3/101%/OS	-411	10	-351	10
213 3/10/1%/Zn	-509	350	-384	80
214 3/10/1%/OS	-380	20	-335	10
215 6/10/4%/OS	-559	870	-470	170
216 6/10/4%/OS	-582	1890	-464	200
221 6/10/4%/ohne	-546	-	-700	-
222 6/10/4%/OS	-619	2120	-442	140
223 3/10/4%/ohne	-538	-	-648	-
224 3/10/4%/OS	-676	1640	-524	140
225 3/10/4%/OS	-684	1350	-506	130
226 3/10/4%/OS	-667	1510	-522	120
231 3/10/2,5%/OS	-505	120	-425	40
232 3/10/2,5%/OS	-545	190	-398	40
233 3/10/2,5%/Zn	-576	1370	-622	30
234 3/10/2,5%/OS	-524	250	-424	30
235 3/10/4%/Zn	-642	2640	-476	190
236 3/10/2,5%/ohne	-541	-	-642	-
241 3/40/2,5%/OS	-509	40	-493	30
242 3/40/2,5%/OS	-529	80	-424	30
243 3/40/2,5%/Zn	-667	990	-509	100
244 3/40/2,5%/OS	-527	70	-388	30
245 3/40/1%/ohne	-401	-	-311	-
246 3/40/2,5%/ohne	-502	-	-553	-
251 3/40/1%/OS	-401	20	-330	10
252 3/40/1%/OS	-388	10	-307	10
253 3/40/1%/OS	-387	10	-345	10
254 3/40/1%/Zn	-604	400	-486	70
255 3/10/0%/ohne	-375	-	-361	-
256 3/10/1%/ohne	-423	-	-411	-

In Bild 4.3-7 wird der Verlauf der Schutzstromdichten an vier ausgewählten Versuchsblöcken dargestellt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Chloridgehaltes bzw. der Bewehrungsdichte. Neben der Abhängigkeit von der Chloridkonzentration werden ausgeprägte Tag-Nacht-Schwankungen sowie jahreszeitliche Abhängigkeiten der Schutzstromdichte erkennbar, die vor allem auf temperaturbedingte Widerstandsänderungen des Betons zurückgeführt werden können. Im Gegensatz dazu ist eine Abhängigkeit von der Bewehrungsdichte nicht zu beobachten. In der Tendenz ist eine Verringerung der Schutzstromdichten erkennbar.

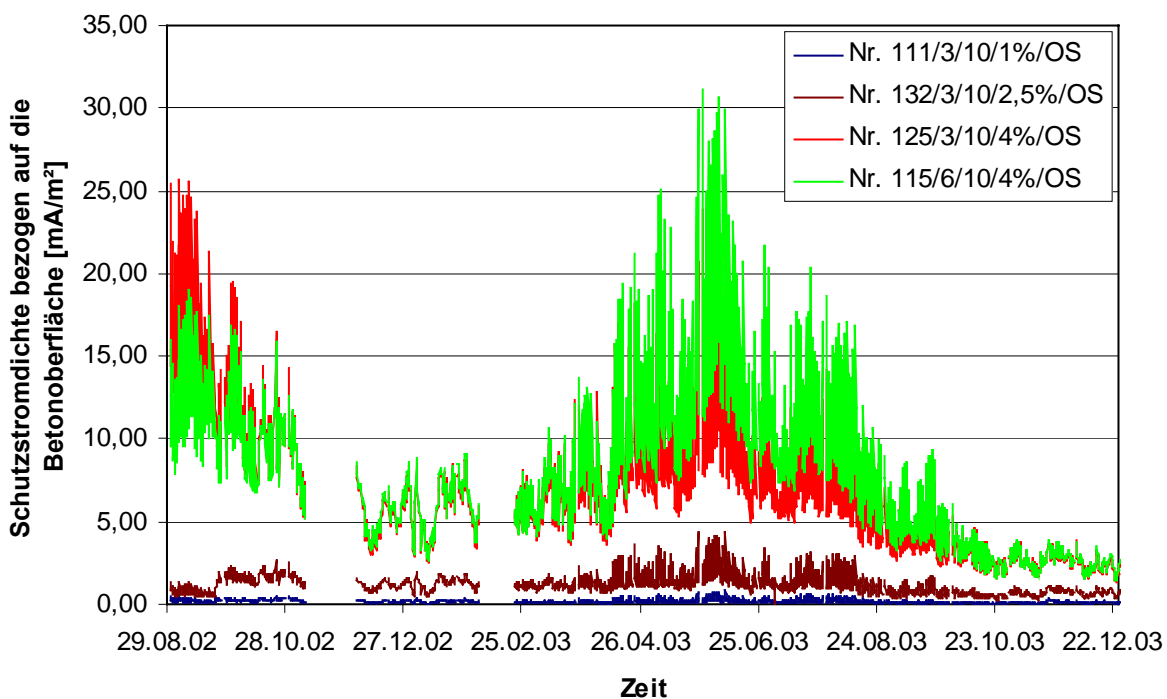


Bild 4.3-7: Typischer Verlauf der Schutzstromdichten an ausgewählten Proben

In Bild 4.3-8 sind die zugehörigen Verläufe der Schutzpotentiale an den betrachteten Versuchsblöcken über den gleichen Zeitraum dargestellt.



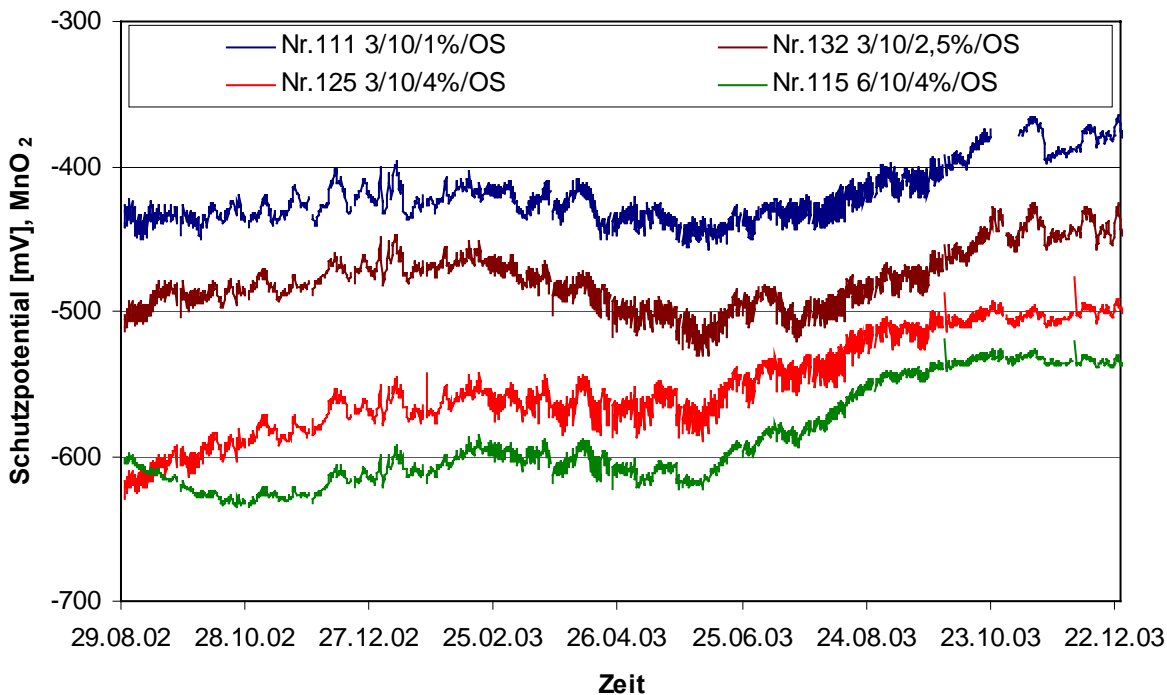


Bild 4.3-8: Typischer Verlauf der Schutzpotentiale an ausgewählten Proben

In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die erreichten Schutzpotentiale ebenso wie die Schutzströme vom Chloridgehalt der Probekörper abhängig sind. Entsprechend der unterschiedlichen Stromdichten werden erwartungsgemäß auch unterschiedliche Schutzpotentiale festgestellt. Über die Versuchszeit wird zudem ein signifikanter Anstieg der Schutzpotentiale um bis zu 100 mV beobachtet. Dieser wird von einem deutlichen Rückgang der Schutzstromdichten begleitet.

Ein direkter Vergleich der über die gesamte Versuchszeit gemittelten Schutzströme zwischen verschiedenen Blöcken verdeutlicht die Unterschiede in Abhängigkeit von den Parametern nochmals (Bild 4.3-9). An Probekörpern mit 1 % Chlorid, die nur eine Spritzverzinkung erhielten, ist die mittlere Schutzstromdichte etwa eine Zehnerpotenz höher als bei Proben mit OS. Bei 4 % Chlorid wird dieser Unterschied nicht mehr erkannt. Die Höhe der Betondeckung hatte keinen Einfluss auf die Höhe der mittleren Schutzstromdichte. Der größte Unterschied wurde in Abhängigkeit vom Chloridgehalt festgestellt. Hier steigen die Werte von etwa 0,2 mA/m<sup>2</sup> bei 1 % Chlorid auf etwa 1 mA/m<sup>2</sup> bei 2,5 % Chlorid und schließlich 5 bis 7 mA/m<sup>2</sup> bei 4 % Chlorid. Die Unterschiede zwischen den beiden Betonserien sind dagegen sehr gering.

Bei einer mittleren Stromdichte von  $7,5 \text{ mA/m}^2$  bezogen auf die Betonoberfläche wäre die aufgetragene Zinkschicht bei gleichmäßiger Stromverteilung nach dem Faraday-Gesetz erst nach 10 bis 11 Jahren vollständig verbraucht. Es ist jedoch zu vermuten dass sich auch bei 4 % Chlorid mit der Zeit noch deutlich niedrigere mittlere Stromdichten einstellen.

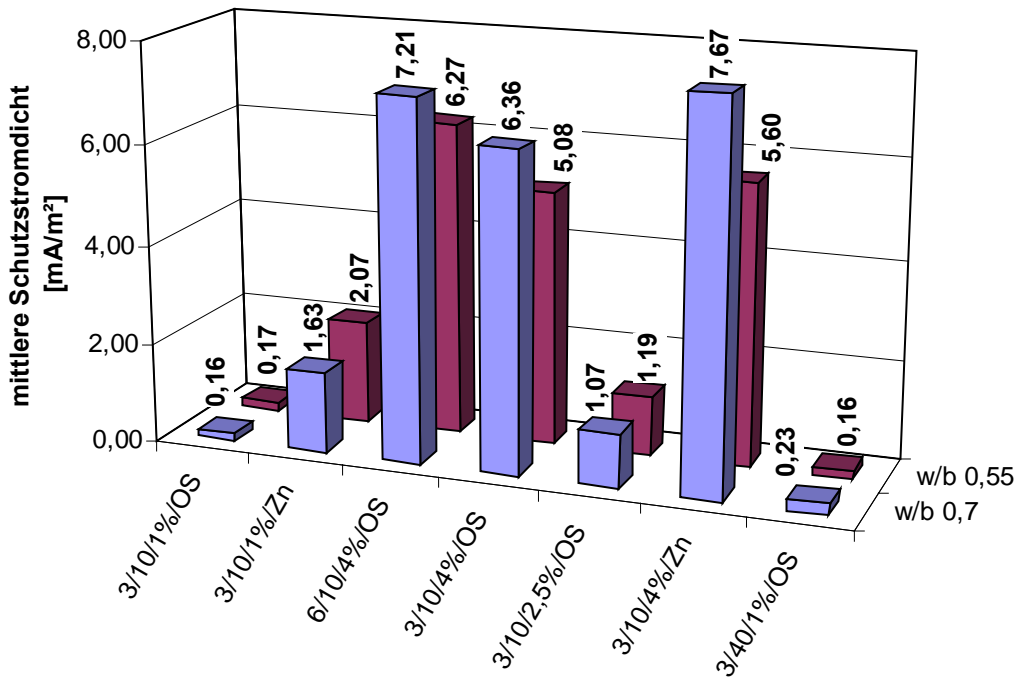


Bild 4.3-9: Mittlere Schutzstromdichte über den gesamten Versuchszeitraum

Die in regelmäßigen Abständen erfolgte Überprüfung des 100 mV Kriteriums bei Ausschaltmessungen zeigte für die Probelöcke ein sehr unterschiedliches Verhalten (Bild 4.3-10 und Bild 4.3-11). Da das Schutzkriterium nach 4 Stunden bei vielen Proben noch nicht erfüllt war, wurde die Beobachtungszeit auf 24 h ausgedehnt. Zum Beginn der Messungen wurde das Kriterium überwiegend erfüllt. Nach einigen Monaten verringerten sich die Werte soweit, dass die Einhaltung lediglich noch für die Versuchsblöcke mit 4 % festgestellt werden konnte. An den übrigen Blöcken wurden nur noch Werte unterhalb von 50 mV registriert. Die Vergleichsproben zeigen, bis auf wenige Ausnahmen in Serie 1 (z. B. 122, 141), ein ähnliches Verhalten.

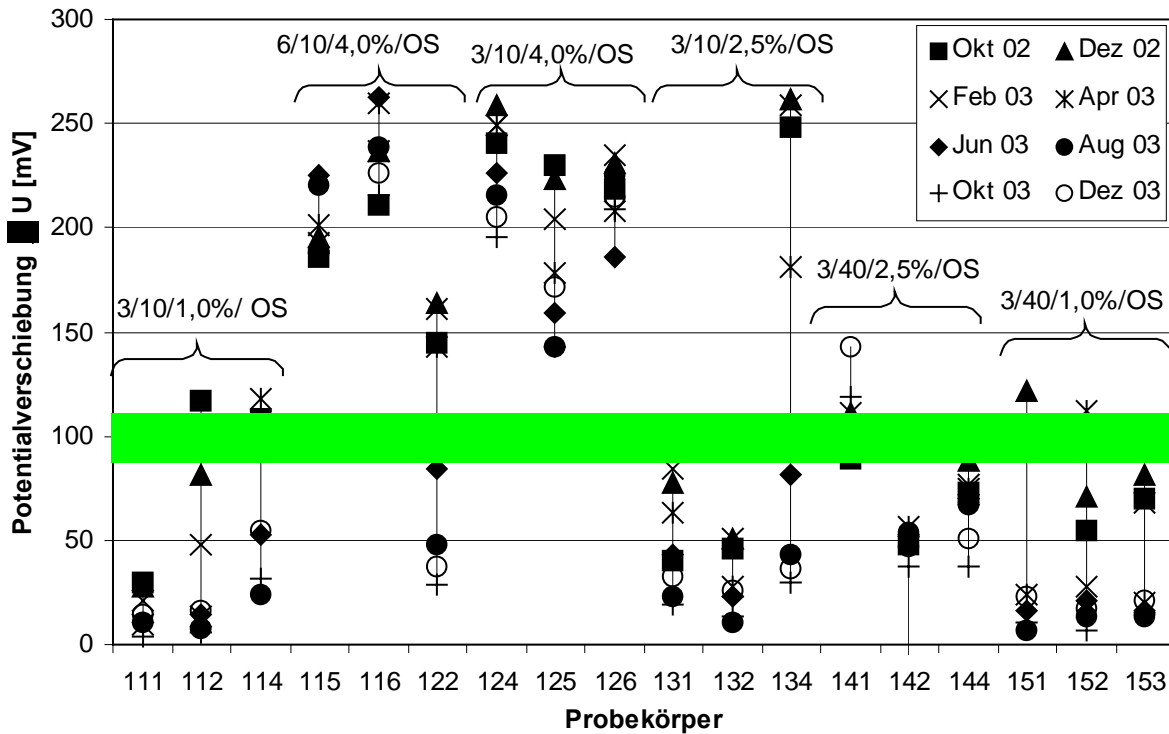


Bild 4.3-10: Depolarisation der Stahlbewehrung bei Ausschaltmessungen 24 h nach Aufhebung des Kontaktes zur Zinkbeschichtung, verschiedene Probekörper der Serie 1

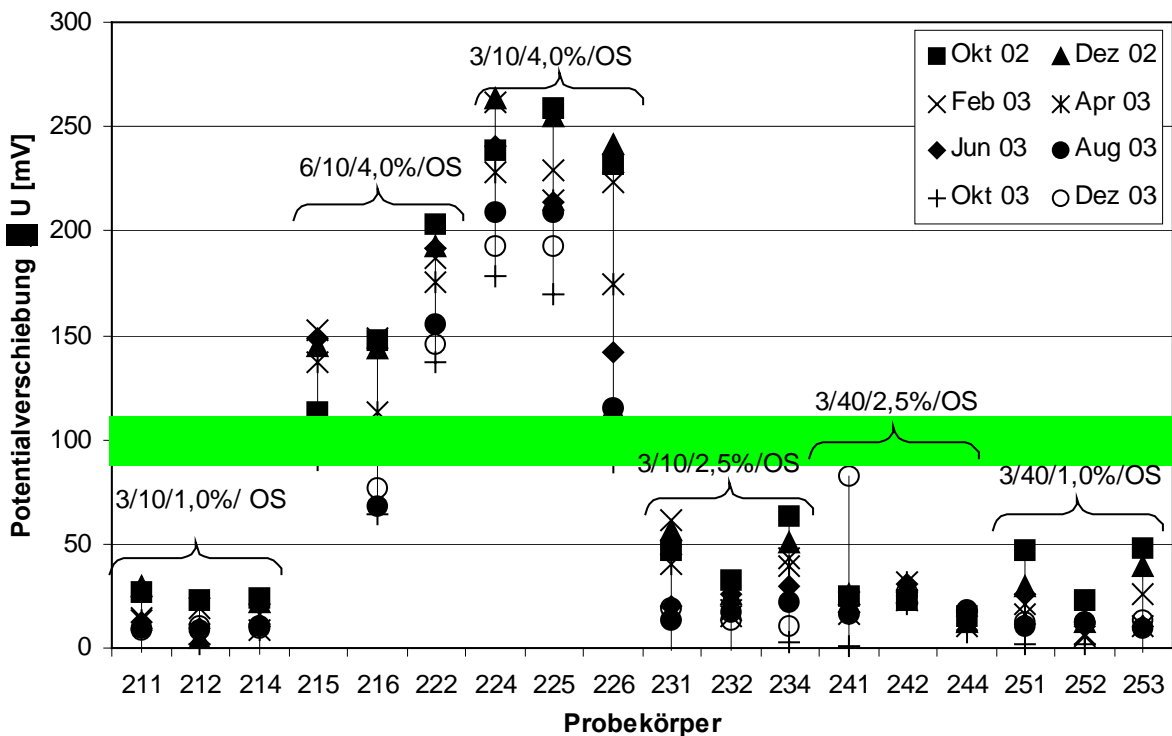


Bild 4.3-11: Depolarisation der Stahlbewehrung bei Ausschaltmessungen 24 h nach Aufhebung des Kontaktes zur Zinkbeschichtung, verschiedene Probekörper der Serie 2

In den Bild 4.3-12 und Bild 4.3-13 sind die freien Korrosionspotentiale der Proben 24 Stunden nach Trennung von der Zinkschicht dargestellt. In beiden Betonserien liegen die Potentialwerte der Bewehrungen zwischen  $-300$  und  $-500$  mV<sub>MnO2</sub>.

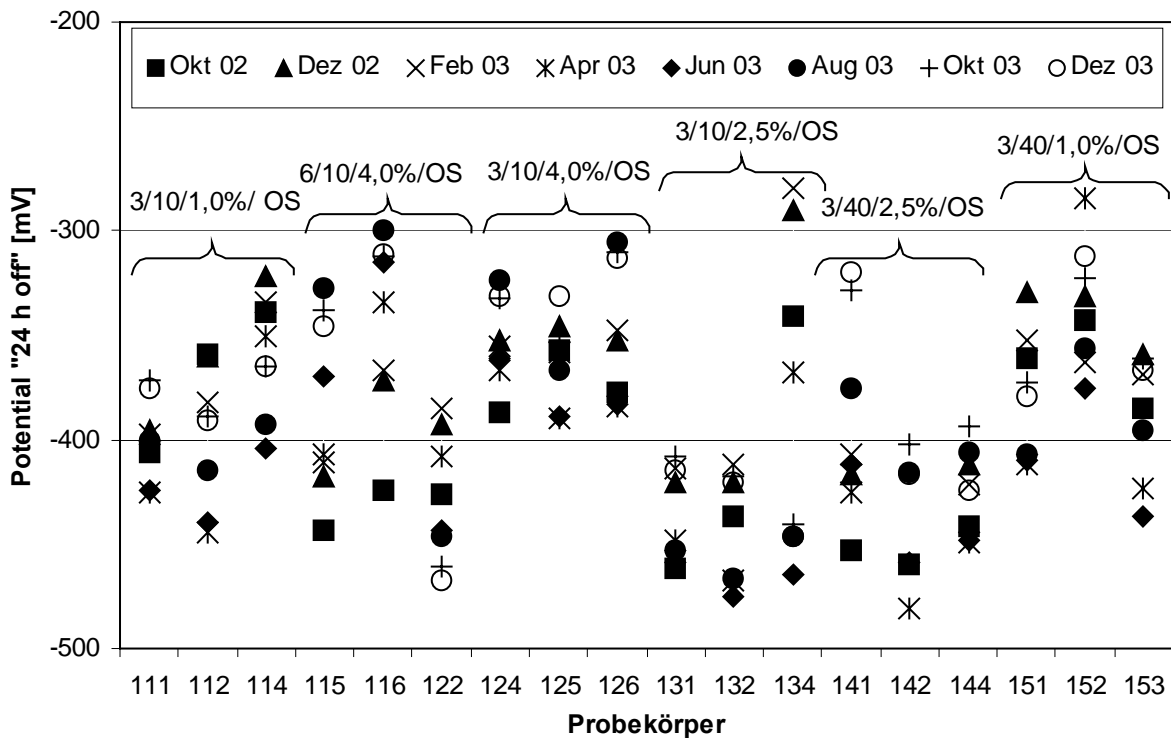


Bild 4.3-12: Potential der einzelnen Probekörper nach 24 h Ausschaltmessung, Serie 1

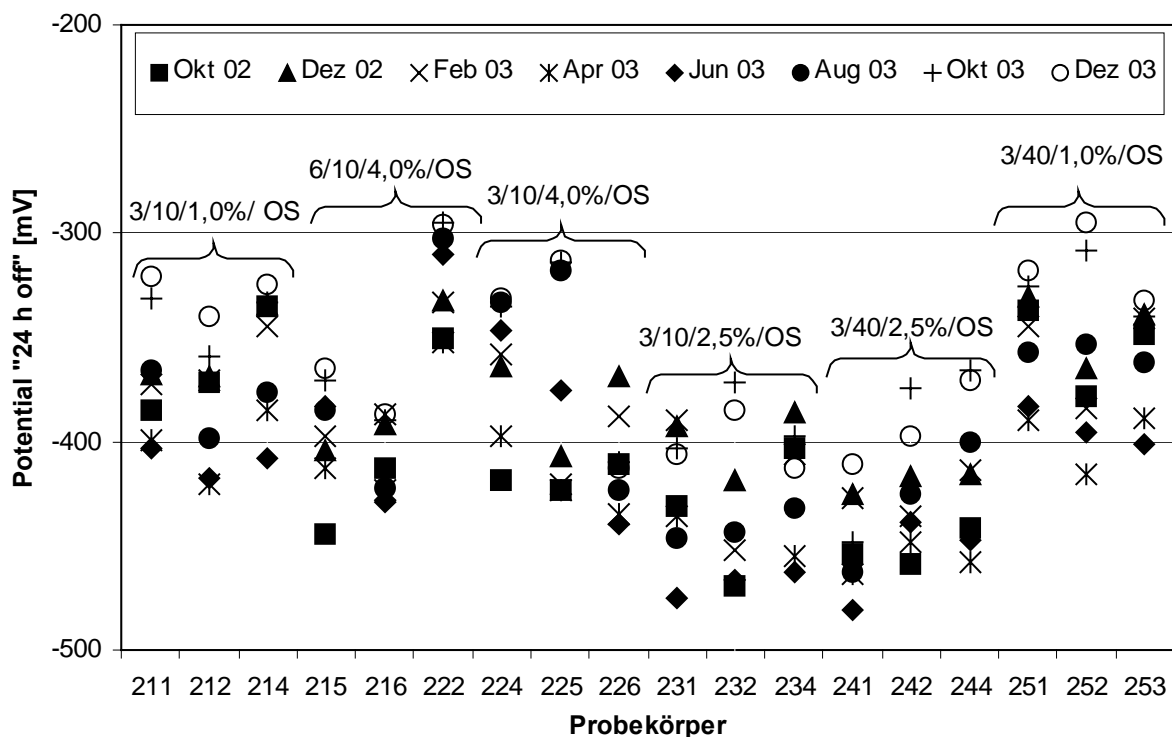
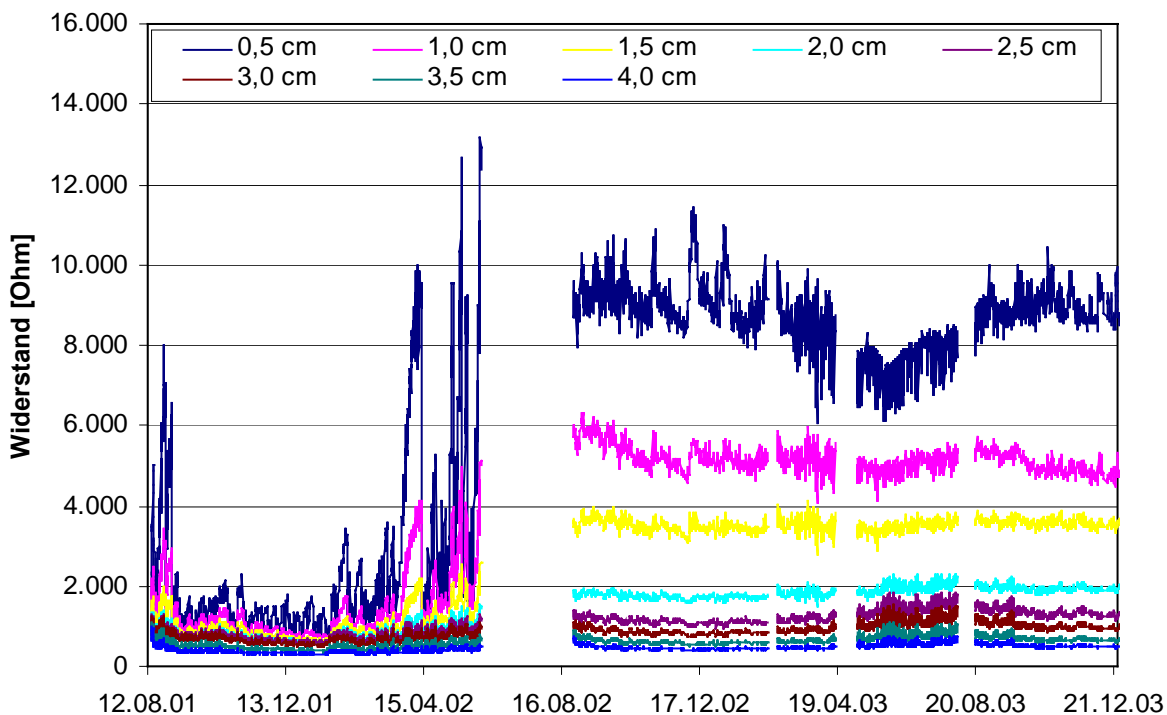


Bild 4.3-13: Potential der einzelnen Probekörper nach 24 h Ausschaltmessung, Serie 2

### 4.3.5.2 Ergebnisse der Feuchtemessungen

Die Zielstellung des kombinierten Schutzsystems aus Spritzverzinkung und abdichtendem Oberflächenschutzsystem ist eine sofortige Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit durch kathodischen Korrosionsschutz und eine Absenkung des Feuchtegehaltes im Bauwerk durch den applizierten Oberflächenschutz. Deshalb war neben der Erfassung der Kennwerte für die Schutzkriterien des kathodischen Korrosionsschutzes auch die Messung des Feuchtegehaltes der Probekörper erforderlich. Diese Messung erfolgte zerstörungsfrei über die bei der Herstellung in ausgewählte Probekörper eingebrachten Multiring-Elektroden. Als Messwerte dienen dabei temperaturkompensierte Widerstandswerte zwischen benachbarten Ringen aus korrosionsbeständigem Stahl. Ein Beispiel für diese Messungen wird in Bild 4.3-14 gezeigt. Im linken Teil des Diagramms ist die zeitliche Veränderung der Feuchtigkeitsverteilung vor Auftrag des abdichtenden Oberflächenschutzsystems dargestellt. Besonders gut zu erkennen sind die starken Schwankungen in den oberflächennahen Bereichen der Probe bis in eine Tiefe von ca. 15 mm. Während längerer Trockenzeiten kommt es zu einer deutlichen Verringerung des Feuchtegehaltes, die nach dem Einsetzen von Niederschlag sehr schnell wieder ansteigt. Nach der Applikation des Oberflächenschutzsystems treten derartige Schwankungen nicht mehr auf.



**Bild 4.3-14:** Widerstandsänderungen am Probekörper 132 vor und nach der Applikation des Oberflächenschutzsystems

Die nachfolgenden Tabellen 3.3-7 bis 3.3-9 zeigen die Ergebnisse der Widerstandsmessungen an allen 8 Probekörpern mit MRE zu drei charakteristischen Zeitpunkten vor und nach der Aufbringung des Oberflächenschutzsystems (OS) sowie zum Ende der Projektlaufzeit. Während sich in den oberflächennahen Bereichen bis etwa 1 cm sehr starke Schwankungen in den Messwerten zeigen, bleiben diese ab einer Tiefe von 2 cm praktisch über die gesamte Projektlaufzeit unverändert.

Tabelle 4.3-7: Widerstandswerte der Probekörper vor Aufbringung des OS (Juni 2002)

Probekörper	$R_{\text{Beton}}$				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5 – 4,0
-	cm				
-	k $\Omega$				
1	2	3	4	5	6
Nr. 111 3/10/1%/OS	23,9	5,2	2,1	1,0	0,8 – 0,5
Nr. 132 3/10/2,5%/OS	12,4	5,0	2,6	1,4	1,1 – 0,8
Nr. 136 3/10/2,5%/ohne	16,5	3,1	1,7	1,2	1,0 – 0,5
Nr. 156 3/10/1%/ohne	2,8	2,3	1,9	1,2	0,8 – 0,5
Nr. 211 3/10/1%/OS	16,6	4,6	2,1	1,3	1,1 – 0,7
Nr. 232 3/10/2,5%/OS	13,0	5,5	2,4	1,5	1,2 – 0,7
Nr. 236 3/10/2,5%/ohne	3,2	2,0	1,4	1,1	0,9 – 0,5
Nr. 256 3/10/1%/ohne	3,4	2,0	1,2	1,0	0,9 – 0,7



Tabelle 3.3-8: Widerstandswerte der Probekörper nach Aufbringung des OS (August 2002)

Probekörper	$R_{\text{Beton}}$				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5 – 4,0
-	cm				
-	k $\Omega$				
1	2	3	4	5	6
Nr. 111 3/10/1%/OS	k. A. <sup>1)</sup>	6,7	2,6	1,4	0,9 – 0,8
Nr. 132 3/10/2,5%/OS	9,4	6,0	3,7	1,9	1,3 – 0,6
Nr. 136 3/10/2,5%/ohne	28,5	3,7	1,9	1,2	1,0 – 0,6
Nr. 156 3/10/1%/ohne	4,4	2,7	2,2	1,3	0,9 – 0,7
Nr. 211 3/10/1%/OS	16,4	9,2	3,9	2,0	1,4 – 1,0
Nr. 232 3/10/2,5%/OS	22,7	9,5	5,1	2,6	1,6 – 1,0
Nr. 236 3/10/2,5%/ohne	5,1	2,5	1,9	1,6	1,3 – 0,8
Nr. 256 3/10/1%/ohne	7,0	2,7	1,5	1,1	1,0 – 0,8

1) Sensor bei Aufbringen des OS zerstört

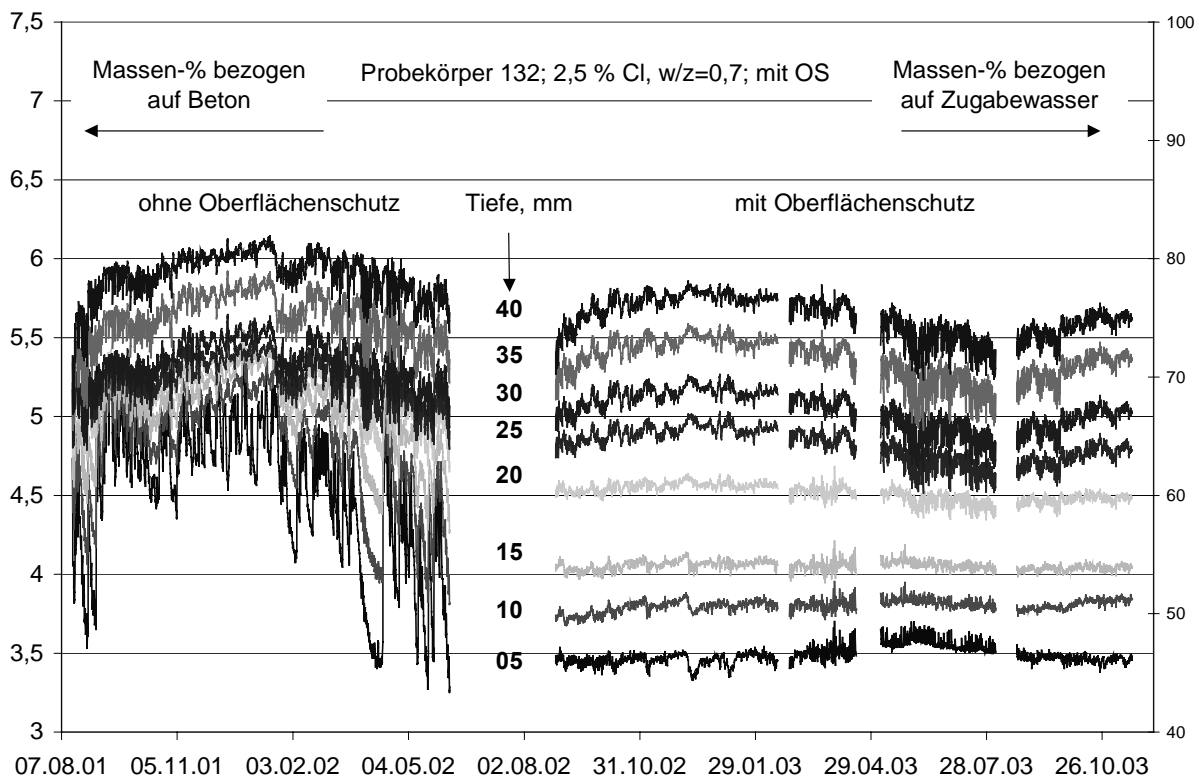
Tabelle 4.3-8: Widerstandswerte nach ca. 16 Monaten Auslagerung (Dezember 2003)

Probekörper	$R_{\text{Beton}}$				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5 – 4,0
-	cm				
-	k $\Omega$				
1	2	3	4	5	6
Nr. 111 3/10/1%/OS	k. A. <sup>1)</sup>	5,5	2,3	1,3	0,9 – 0,8
Nr. 132 3/10/2,5%/OS	8,7	4,7	3,5	1,9	1,3 – 0,5
Nr. 136 3/10/2,5%/ohne	6,4	2,1	1,0	0,8	0,7 – 0,4
Nr. 156 3/10/1%/ohne	3,1	1,7	1,4	0,9	0,7 – 0,5
Nr. 211 3/10/1%/OS	22,5	13,8	4,6	2,0	1,5 – 0,8
Nr. 232 3/10/2,5%/OS	19,8	10,8	6,3	2,6	1,6 – 0,9
Nr. 236 3/10/2,5%/ohne	3,7	3,2	1,6	1,0	0,8 – 0,6
Nr. 256 3/10/1%/ohne	6,4	1,7	1,1	0,9	0,8 – 0,6

1) Sensor bei Aufbringen des OS zerstört

Über Korrelationskurven können die gemessenen Widerstandswerte bestimmten Feuchtegehalten zugeordnet werden. Die Bild 4.3-15 zeigt am Beispiel des Probekörpers 132 den Verlauf der Feuchtigkeitsgehalte durch Umrechnung der Widerstandswerte. Nach Applikation des Oberflächenschutzsystems wurden innerhalb der verfügbaren Messzeit keine signifikanten Feuchteänderungen an den Probekörpern festgestellt. Kurzfristige Tag/Nacht-Schwankungen bzw. geringfügige jahreszeitliche Änderungen sind auf eingeschränkte Möglichkeiten der Temperaturkompensation zurückzuführen. Sie geben damit keine Auskunft über tatsächliche Änderungen der Feuchtigkeit.

Demnach blieb eine signifikante Austrocknung der Probekörper im Bereich praktischer Betondeckungen von 3 cm aus. In den oberflächennahen Bereichen waren die Feuchtigkeitsgehalte allerdings bereits zum Beginn des kathodischen Korrosionsschutzes relativ gering.



**Bild 4.3-15:** Feuchteänderungen am Probekörper 132 vor und nach der Applikation des Oberflächenschutzsystems

Gravimetrische Feuchtebestimmungen an ausgewählten Probekörpern im Dezember 2003 bestätigten die Größenordnung der aus den MRE-Messungen abgeleiteten Feuchtegehalte. So wurden an Probekörpern mit OS in einer Tiefenlage bis 2 cm Feuchtegehalte um 3,5 % bezogen auf den Beton ermittelt. Unterhalb von 2 cm lag der Feuchtegehalt zwischen 4 und 5 %. Dagegen lagen die Feuchtegehalte an Probekörpern ohne OS in einer Größenordnung von etwa 6 %.

### 4.3.5.3 Verhalten des Oberflächenschutzsystems

Bereits innerhalb weniger Tagen nach Kontaktierung von Zinkschicht und Bewehrung wurde bei einigen Proben eine Blasenbildung im Oberflächenschutzsystem (Bild 4.3-16) beobachtet. Es waren ausschließlich Probekörper mit einem Chloridgehalt von 4 % bezogen auf den Zement betroffen. An diesen Proben wurden zu Beginn der Auslagerung kurzzeitig relativ hohe Schutzstromdichten gemessen (siehe Tabelle 4.3-9). Im Bereich größerer Blasen bildeten sich nach einiger Zeit Risse. In Bild 4.3-16 sind die Blasen und die damit verbundene Rissbildung auf der Oberfläche des Probekörpers deutlich zu erkennen.

Tabelle 4.3-9: Maximale Stromdichten zu Beginn der Auslagerung bei Prüfkörpern mit 4 % Chlorid

Probekörper		max. Stromdichte
-		mA/m <sup>2</sup>
1	2	3
116	6/10/4,0%/OS	48,3
122	6/10/4,0%/OS	51,3
125	3/10/4,0%/OS	76,9
215	6/10/4,0%/OS	61,7
216	6/10/4,0%/OS	58,3
222	6/10/4,0%/OS	60,0
224	3/10/4,0%/OS	34,7
225	3/10/4,0%/OS	75,4
226	3/10/4,0%/OS	30,7

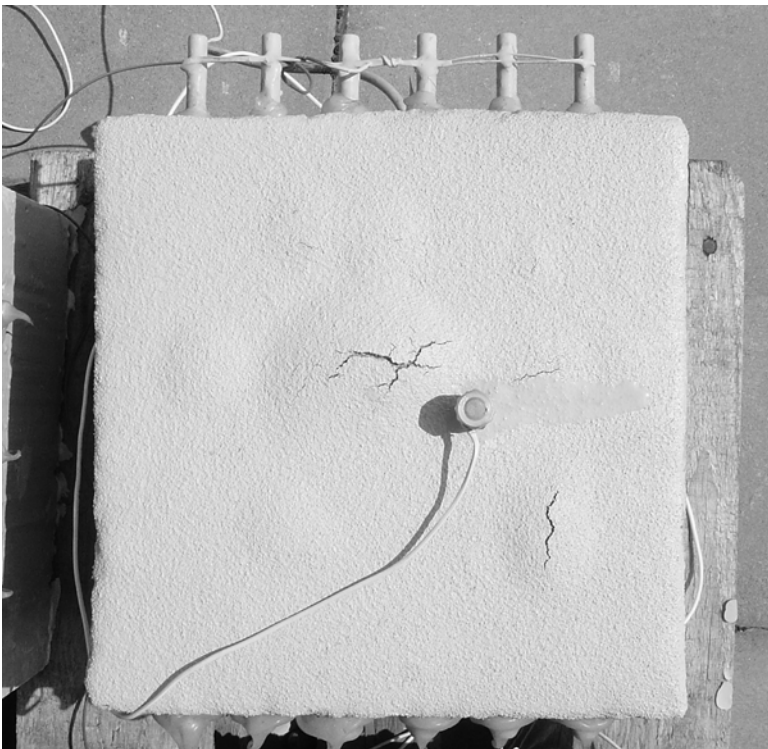


Bild 4.3-16: Blasenbildung am Oberflächenschutzsystem und betroffene Probekörper

Ein Beispiel für die zeitliche Entwicklung der Blasenbildung im Oberflächenschutzsystem wird in Bild 4.3-17 gezeigt. Nach der Entstehung der Blasen im Sommer/Herbst 2002 wurden im Winter 2002/2003 keine signifikanten Veränderungen festgestellt. Erst im Frühjahr 2003 konnte bei steigenden Temperaturen und Schutzströmen eine Vergrößerung der vorhandenen Blasen und die Bildung neuer Blasen beobachtet werden. Die Blasenentwicklung kam im Juni/Juli 2003 praktisch zum Erliegen. Trotz gleichbleibend hoher Temperaturen sanken die Schutzströme ab und der Blaseninnendruck verringerte sich merklich. Ein weiteres Blasenwachstum bzw. die Bildung neuer Blasen wurde anschließend nicht mehr beobachtet.

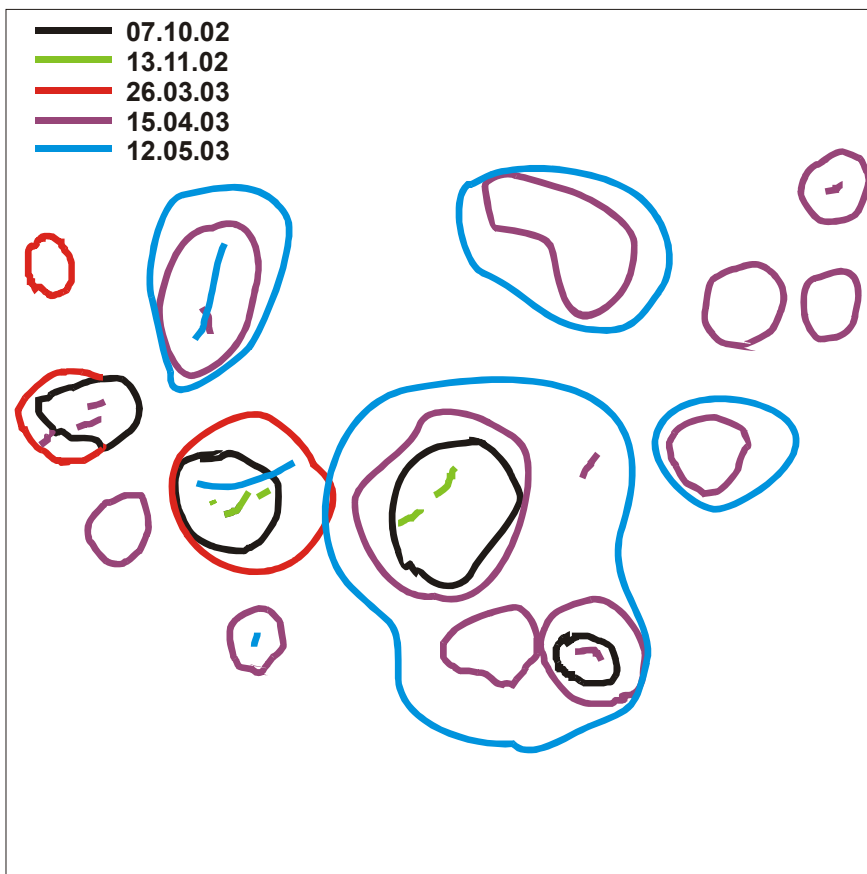


Bild 4.3-17: schematische Darstellung der fortschreitenden Oberflächenschäden (Blasen und Risse) an Probe 222

An allen Blasen war ein solcher Innendruck vorhanden, dass sich diese nicht niederdrücken ließen. Beim Aufstechen der Blasen war das Entweichen eines Gases deutlich vernehmbar.

Im Dezember 2002 wurde eine Fehlstelle des Probekörpers Nr. 216 mittels eines kleinen Trennschleifers geöffnet, um die genaue Lage der Blasen innerhalb des Beschichtungssystems festzustellen (Bild 4.3-18).



Bild 4.3-18: geöffnete Fehlstelle Probe 216

Dabei wurde eine Enthftung des Schutzsystems unmittelbar an der Zinkschicht festgestellt, wobei die Zinkschicht selbst auf der Betonoberfläche verblieb. Die Risttiefe reichte bis zur elastischen Schutzschicht. Aufgrund ihrer elastischen Eigenschaften verhindert diese Schicht das Eindringen von Feuchtigkeit durch den entstanden Riss. In der Praxis muss mit dem Ausfall dieses Schutzsystems gerechnet werden, da eine mechanische Belastung der Oberfläche zu Abplatzungen der Schutzschichten führen würde.

#### **4.3.5.4 Zustand der ausgebauten Bewehrungsstäbe**

Zur Dokumentation des Bewehrungszustandes wurden an ausgewählten Proben, nach insgesamt 30 Monaten Auslagerung Bewehrungsstäbe ausgebaut. Ein Beispiel für das beim Ausbau vorgefundene Erscheinungsbild der Bewehrung wird in Bild 4.3-19 gezeigt.





Bild 4.3-19: Ausbau von Bewehrungsstäben, Probekörper 124 3/10/4%/OS

Beim Ausbau der Bewehrung zeigten nahezu alle Stäbe ausgeprägte Korrosionserscheinungen. Der Korrosionsangriff trat verstärkt an der Bewehrungsunterseite (6-Uhr-Lage) auf. Um den tatsächlichen Korrosionsangriff beurteilen und den Korrosionsabtrag quantifizieren zu können, wurden die Stäbe gereinigt und gebeizt. Anschließend wurden die Stäbe ausgewogen und der Masseverlust bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.3-10 dargestellt.

Tabelle 4.3-10: Masseverluste der Bewehrungsstäbe infolge Korrosion

Bewehrungsstäbe	Masse der Stäbe nach Ausbau	Masseverlust	Mittlerer Masseverlust	Abtragsrate
-	g			g/m <sup>2</sup> a
1	2	3	4	5
112 – 3/10/1%/OS	211,8	2,9	2,3	100
	212,8	1,9		
	212,5	2,2		
156 – 3/10/1%/ohne	210,3	4,4	4,4	175
145 – 3/40/1%/ohne	212,8	1,9	1,9	75
153 – 3/40/1%/OS	212,7	2,0	1,8	75
	213,1	1,6		
	212,9	1,8		
131 – 3/10/2,5%/OS	209,1	5,6	5,4	225
	209,7	5,0		
	209,1	5,7		
136 – 3/10/2,5%/ohne	208,8	6,0	6,0	250
124 – 3/10/4%/OS	211,0	3,8	3,0	125
	212,7	2,0		
	211,6	3,1		
135 – 3/10/4%/Zn	210,6	4,1	4,3	175
	211,8	2,9		
	208,8	5,9		
123 – 3/10/4%/ohne	203,6	11,1	8,1	325

Ein Vergleich zwischen den ungeschützten Probekörpern mit unterschiedlichem Chloridgehalt zeigt erwartungsgemäß einen zunehmenden Korrosionsangriff mit steigendem Chloridgehalt. So erhöhen sich die Abtragsraten von 175 g/m<sup>2</sup>a bei Probe 156 (1 % Chlorid) auf 250 g/m<sup>2</sup>a bei der Probe 136 (2,5 % Chlorid) und schließlich auf 325 g/m<sup>2</sup>a an der Probe 123 (4 % Chlorid). Bild 4.3-20 zeigt beispielhaft das typische Erscheinungsbild der Bewehrungsstäbe in Abhängigkeit vom Chloridgehalt.

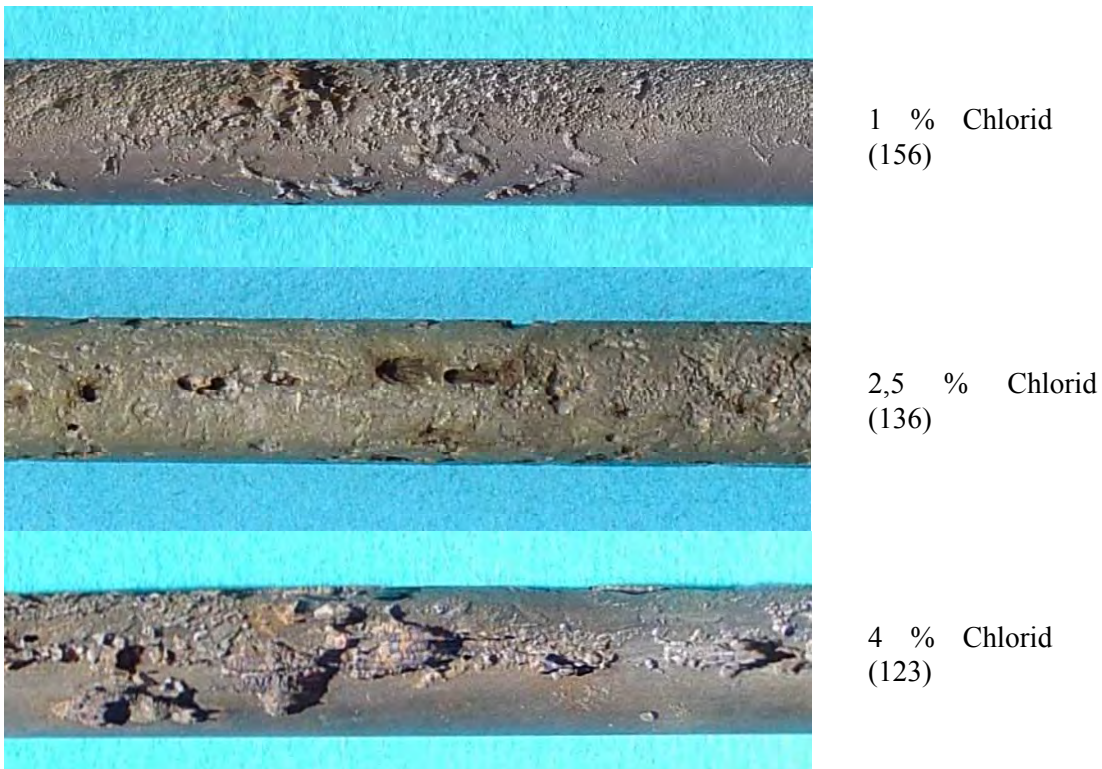


Bild 4.3-20: Erscheinungsbild der ausgebauten Bewehrung nach dem Beizen; Proben ohne OS, unterschiedlicher Chloridgehalt

Bei den Probekörpern mit OS ergibt sich hingegen keine eindeutige Abhängigkeit. Hier liegt der flächenbezogene Masseverlust am Probekörper 131 (2,5 % Chlorid) mit  $225 \text{ g/m}^2\text{a}$  deutlich höher als beim Probekörper 124 (4 % Chlorid) mit  $125 \text{ g/m}^2\text{a}$ . Der Probekörper 112 (1 % Chlorid) weist mit  $100 \text{ g/m}^2\text{a}$  die geringsten Werte auf. Das typische Erscheinungsbild der ausgebauten Bewehrung wird in Bild 4.3-21 gezeigt. Mit steigendem Chloridgehalt nimmt die Tiefe der Korrosionsnarben zu, während sich der flächenhafte Korrosionsabtrag eher verringert.

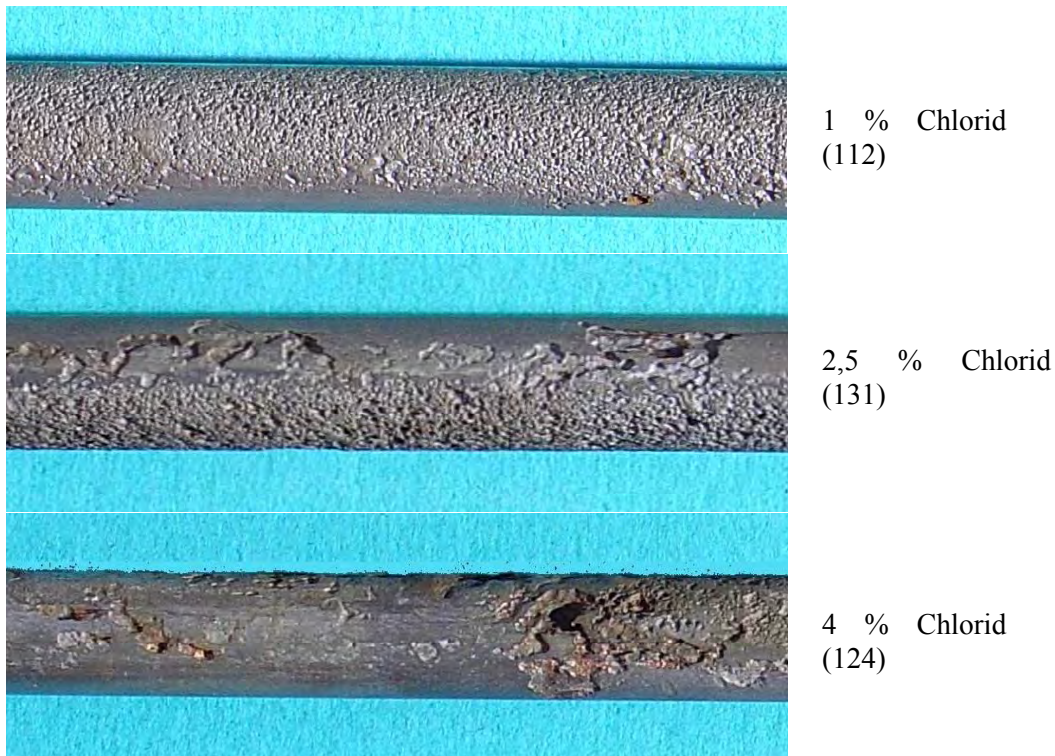


Bild 4.3-21: Erscheinungsbild der ausgebauten Bewehrung nach dem Beizen; Proben mit OS, unterschiedlicher Chloridgehalt

Beim Vergleich der Proben aus Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21 wird deutlich, dass der narbenförmige Korrosionsangriff bei den Proben ohne Oberflächenschutzsystem ausgeprägter ist. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich der Proben 112 und 156 (beide 1 % Chlorid). Während die Probe 112 fast ausschließlich einen relativ gleichmäßigen Oberflächenangriff zeigt, ist die Probe 156 in einigen Bereichen narbenförmig angegriffen. Neben dem unterschiedlichen Angriffsbild liegt die Abtragsrate an der Probe 156 etwa doppelt so hoch wie an der Probe 112. Dieser Unterschied ist offensichtlich auf die Wirkung des applizierten Oberflächenschutzsystems zurückzuführen. Durch das abdichtende OS wurde der direkte Feuchtigkeitzutritt unterbunden. Gleichzeitig war die Feuchtigkeit während der 16-monatigen Auslagerung nach Applikation des OS mit Werten um 4 M.-% sehr gering. Ob eine zusätzliche kathodische Schutzwirkung der Spritzverzinkung auftrat, lässt sich hieraus nicht ableiten.

Wird in die Betrachtungen die Probe 145 (40 mm Betondeckung, ohne OS) mit einbezogen, so zeigt sich, dass deren Abtragsrate geringfügig unter dem Wert für die Probe 112 liegt. Entweder zeigten beide Probekörper eine gleichbleibende Korrosionsrate oder es ist davon auszugehen, dass die Probe 145 über die Auslagerungszeit von 30 Monaten gleichmäßig



korrodierte, während die Probe 112 in den ersten 14 Monaten eine deutlich erhöhte Korrosionsgeschwindigkeit zeigte, die erst mit der Applikation des Oberflächenschutzsystems in den darauf folgenden 16 Monaten drastisch vermindert wurde.

Um die Wirkung der Spritzverzinkung hinsichtlich KKS zu beurteilen, bedarf es eines Vergleiches zwischen der Probe 145 (ohne OS) und der Probe 153 (mit OS) bei einer Betondeckung von 40 mm (Bild 4.3-22). Hier wird der direkte Wasserzutritt allein schon durch die ausreichende Betondeckung vermieden. Aus den Feuchtemessungen ist bekannt, dass sich die Feuchtigkeitsgehalte in dieser Tiefenlage im Betrachtungszeitraum von 30 Monaten nicht unterscheiden, unabhängig davon ob ein OS aufgebracht wurde oder nicht. Deshalb kommt dem OS in diesem Fall keine unmittelbare Bedeutung zu. Da beide Proben gleiche Abtragsraten zeigen, kann in diesem Fall davon ausgegangen werden, dass hier eine kathodische Schutzwirkung durch die Spritzverzinkung nicht gegeben war. Unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Vorkorrosion beider Proben wäre an der Probe 153 eine geringere Abtragungsrate zu erwarten, wenn eine kathodische Schutzwirkung bestanden hätte.



Bild 4.3-22: Erscheinungsbild der ausgebauten Bewehrung nach dem Beizen

Bestätigt wird diese Aussage auch beim Vergleich der Proben 131 und 136 (Bild 4.3-20 und -21) mit jeweils 2,5 % Chlorid. Die Abtragsraten liegen deutlich über denen der Proben mit 1 % Chlorid, weisen aber für beide Proben fast identische Werte auf. Möglicherweise war in diesem Fall die im Bereich der Bewehrung vorhandene Feuchte bei der Applikation des Oberflächenschutzsystems größer, als bei der Probe mit 1 % Chlorid. In jedem Fall kann auch hier eine Schutzwirkung der Spritzverzinkung nicht erkannt werden.

Bei den Proben mit 4 % Chlorid sieht die Einschätzung der Schutzwirkung durch die Zinkschicht dagegen günstiger aus. Ein Vergleich zwischen den Proben 123 und 135 lässt eine signifikante Wirksamkeit der Spritzverzinkung erkennen. So liegt die Abtragsrate bei der Probe 135 (mit Spritzverzinkung) mit  $175 \text{ g/m}^2\text{a}$  nur bei etwa der Hälfte des Wertes, der für die Probe 123 mit  $325 \text{ g/m}^2\text{a}$  ermittelt wurde (Bild 4.3-23).



Bild 4.3-23: Erscheinungsbild der ausgebauten Bewehrung nach dem Beizen

#### 4.3.6 Diskussion

Auf der Basis der gemessenen elektrochemischen Kennwerte ist festzustellen, dass allgemein anerkannte Schutzkriterien /16, 17, 18/ an verschiedenen Versuchsblöcken nur zeitweise, überwiegend jedoch nicht erfüllt werden. Bild 4.3-24 gibt einen Gesamtüberblick darüber, an welchen Probekörpern typische Kriterien für den kathodischen Schutz erfüllt wurden und wo dies nicht der Fall war.



Proben	1% Cl	2,5 % Cl	4 % Cl
<b>kathodischer Schutz</b> Potential < – 875 mV MnO <sub>2</sub>	○	○	○
typ. Stromdichte 2 bis 20 mA/m <sup>2</sup>	○	○	+
<b>kathodische Vorbeugung</b> Potential < – 450 mV MnO <sub>2</sub>	○	+ / ○	+
typ. Stromdichte 0,2 ... 2 mA/m <sup>2</sup>	+ / ○	+	+
<b>Depolarisation</b> > 100 mV nach max. 24 h bzw. > 150 mV nach 48 h*	○	○	+

\* nur bei Einzelmessungen geprüft

○ Kriterium nicht erfüllt

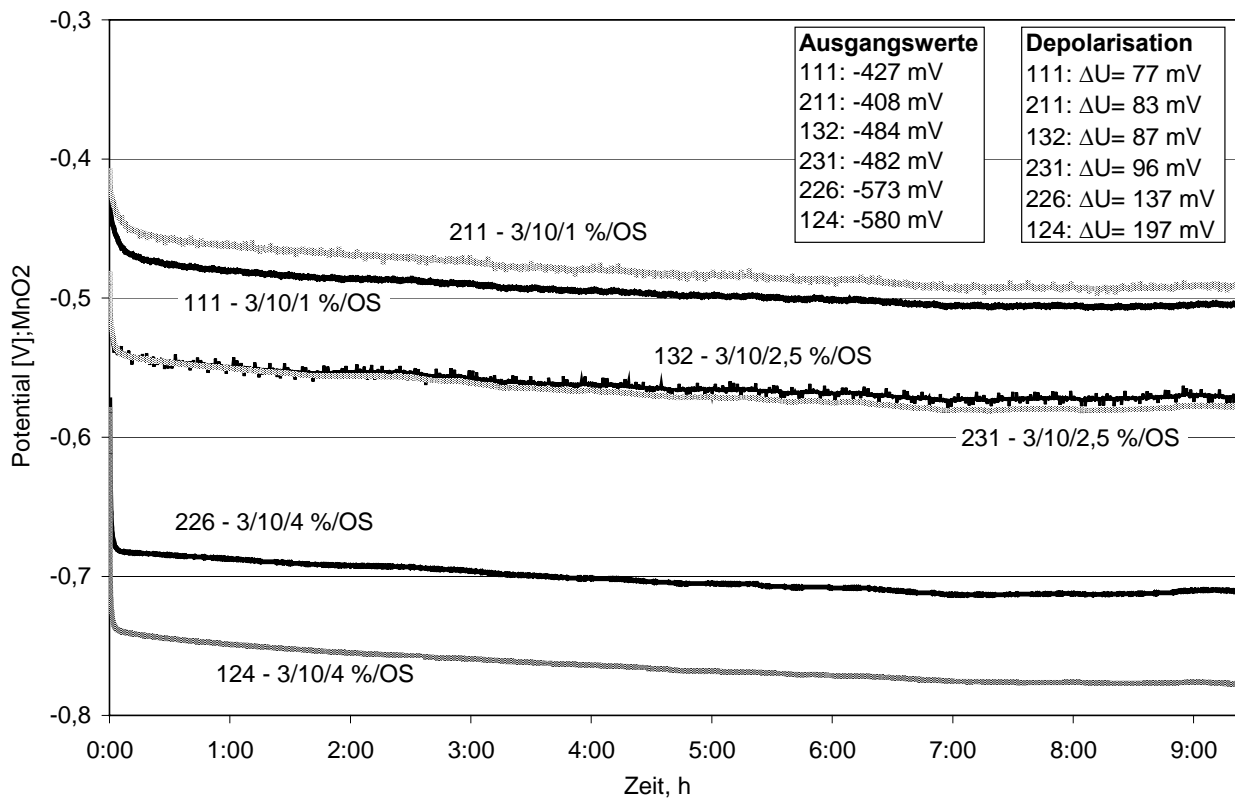
+ Kriterium erfüllt

+ / ○ Kriterium nur zeitweise erfüllt

**Bild 4.3-24:** Typische Kriterien für den kathodischen Korrosionsschutz

Die Nachweisbarkeit eines möglichen Korrosionsschutzes durch Spritzverzinkung ist mittels elektrochemischer Methoden lediglich bei Chloridgehalten von 4 % möglich. Bei geringeren Chloridgehalten als 2,5 % muss nach den bisherigen Ergebnissen die Anwendung des Systems folglich auf solche Bauwerke beschränkt bleiben, an denen aufgrund der Chloridkontamination eine latente Korrosionsgefahr besteht, die Bewehrung aber noch keinen Korrosionsangriff zeigt (kathodische Vorbeugung). Bei Chloridgehalten von 1 % Chlorid werden aber auch die Kriterien für die kathodische Vorbeugung nicht mehr sicher erfüllt. Dadurch werden die Einsatzmöglichkeiten des Schutzsystems eindeutig begrenzt. Demnach lassen die durchgeführten Untersuchungen keinen Rückschluss auf eine allgemein ausreichende Funktionssicherheit des kathodischen Korrosionsschutzes durch Spritzverzinkung zu.

Zur Klärung der Ursachen für das nicht Erfüllen der verschiedenen Kriterien, wurden Ausschaltmessungen am Zink durchgeführt. Bei diesen Messungen wurde festgestellt, dass die Spritzverzinkung bei den Probelblöcken mit 1 bzw. 2,5 % bereits nach einem Jahr weitgehend deaktiviert war (Bild 4.3-25).



**Bild 4.3-25:** Depolarisation der Zinkschicht während Ausschaltmessungen im Juni 2003, Probekörper mit unterschiedlichen Chloridgehalten

Im Vergleich zum freien Korrosionspotential der zu schützenden Bewehrung (vgl. Bilder 4.3-12 und -13) betrug der Potentialunterschied der Zinkbeschichtung teilweise nur 100 bis maximal 300 mV. Diese sehr geringe Treibspannung führt bei den gleichzeitig vorhandenen oberflächennahen Betonwiderständen von 10 bis 20 k $\Omega$  zu keiner ausreichenden kathodischen Polarisation der Stahlbewehrung. Bereits kurze Zeit nach der thermischen Spritzverzinkung lag die verfügbare Treibspannung zwischen maximal 450 mV (4 % Chlorid) und minimal etwa 100 mV (1 % Chlorid). Übliche Treibspannungen für den kathodischen Korrosionsschutz mit Fremdstrom liegen bei etwa 2 bis 4 V und höher. Dennoch war eine sofortige oder schnelle Deaktivierung der Spritzzinkschichten nicht erwartet worden, da Zink in Kontakt zu Baustoffen mit hohen pH-Werten eigentlich aktiv bleiben sollte. Eine Erklärung für die schnelle Deaktivierung könnte in der Karbonatisierung der Betonoberfläche liegen, die aufgrund der geringen Betonqualität und der 14-monatigen Freibewitterung schon weiter fortgeschritten ist. Eine derartige Karbonatisierung müsste in jedem Fall auch bei Installation dieses Systems an bereits bestehenden Bauwerken berücksichtigt werden.

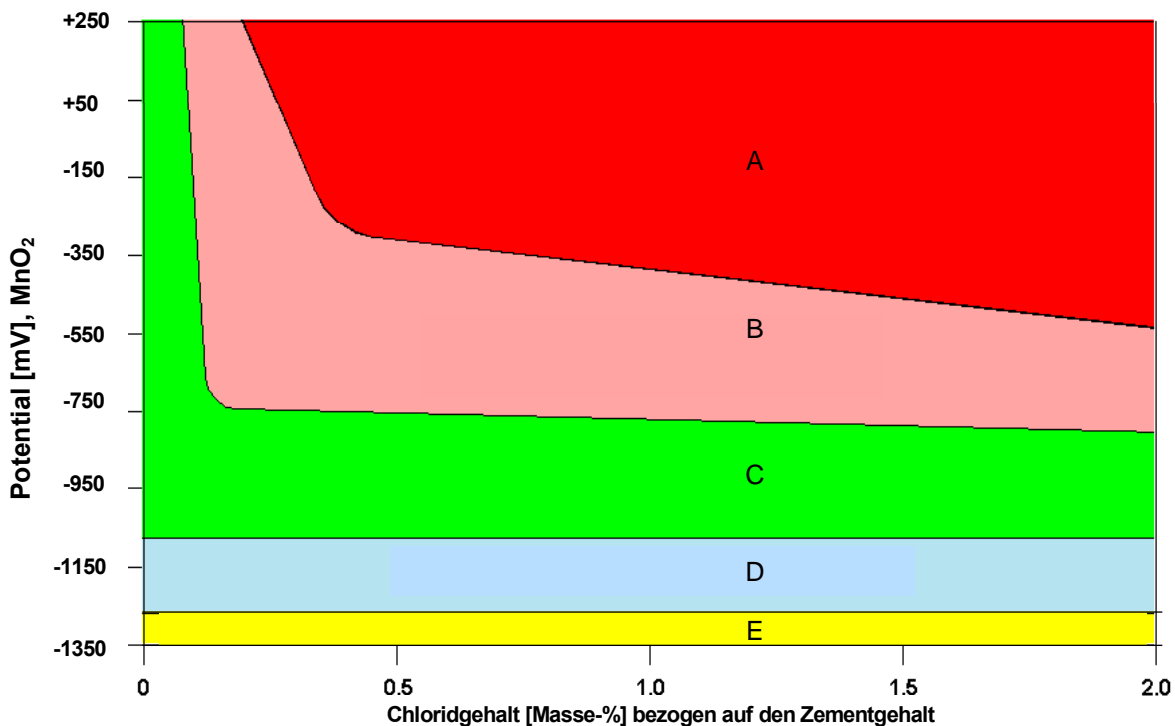
Neuere Hinweise aus der Literatur zeigen, dass sich der Einsatz von reinem Zink aufgrund der raschen Deaktivierung durch die Reaktion mit Beton nur bedingt als kathodischer Korrosionsschutz eignet. Bessere Ergebnisse wurden mit Al-Zn-In-Legierungen erzielt, bei denen die Deaktivierungsneigung deutlich geringer und demzufolge die Schutzstromausbeute höher ist /19/. Die damit verbundene erhöhte Eigenkorrosion an der galvanischen Anode kann die Haftzugfestigkeit nachteilig beeinflussen, was deren Einsatz auf Verkehrsflächen praktisch ausschließt.

Der Widerstand der Betondeckung war schon unmittelbar nach der Applikation der Zinkschicht sowie des Oberflächenschutzsystems relativ hoch. Deshalb ist im unmittelbaren Kontaktbereich zwischen Zink und Beton bereits zu Beginn der Messungen von einem relativ geringen Feuchtigkeitsangebot auszugehen, welches die Wirkung der Zinkbeschichtung als galvanische Anode ebenfalls erheblich einschränkt. Dies bestätigt sich auch durch die etwas höheren Schutzströme an Proben die nur eine Spritzverzinkung, jedoch keine abdichtende Oberflächenbeschichtung erhielten. Ursache für diese bereits zu Versuchsbeginn bestehende Austrocknung ist der Versand und die Lagerung der Probestücke, die für die Applikation der Spritzverzinkung erforderlich war. Hierdurch wurde die Freibewitterung der Proben für einen Zeitraum von etwa 6 Wochen unterbrochen, was die relativ hohen Widerstandswerte in den oberflächennahen Bereichen erklärt. Die ungeschützten Vergleichsblöcke sind davon nicht betroffen, da diese ohne Unterbrechung der Freibewitterung ausgesetzt waren. Bei den nur verzinkten Proben konnte über die nicht vollständig abgedichtete Oberfläche anschließend erneut Feuchtigkeit eindringen, was bei den Proben mit OS nicht möglich war.

Versuche mit Fremdstrombeaufschlagung ergaben, dass für die Erreichung von Schutzpotentialen im Bereich um  $-800 \text{ mV}_{[\text{MnO}_2]}$  an den Versuchsblöcken Stromdichten von 25 bis  $50 \text{ mA/m}^2$  erforderlich waren, die bei dem vorhandenen Widerstand der Betondeckung jedoch nur mit Treibspannungen von etwa 3 bis 4 V erreicht werden konnten. Eine nachhaltige Reaktivierung der Zinkschicht war damit jedoch nicht möglich. Bei konstanter Fremdstrombeaufschlagung wurde ein langsamer Anstieg der notwendigen Treibspannungen beobachtet. Dies ist ein Hinweis dafür, dass der Übergangswiderstand Zink/Beton durch die Fremdstrombeaufschlagung ansteigt, was mit der Bildung von Korrosionsprodukten am Zink erklärt werden kann.

Untersuchungen bei der Firma Grillo zeigen, dass unter der Bedingung „keine nennenswerte Vorkorrosion der Bewehrung“ ein kathodischer Schutz offensichtlich möglich ist. Dies kann dadurch erklärt werden, dass für den Schutz einer passiven Bewehrung nur die Vermeidung

der Überschreitung kritischer Potentialwerte erforderlich ist. Nach Bild 4.3-26 reichen die festgestellten Schutzpotentiale im Bereich zwischen  $-400$  (bei geringen Chloridgehalten) und  $-600$   $\text{mV}_{[\text{MnO}_2]}$  (bei höheren Chloridgehalten) aus, um die Entstehung von Korrosion zu vermeiden. Gleichzeitig sind die erforderlichen Schutzstromdichten wesentlich geringer (siehe Tabelle 3.3-7).



- A: Lochinitiierung und -wachstum
- B: keine Initiierung, aber Lochwachstum möglich
- C: keine Lochinitiierung und kein Lochwachstum möglich
- D: Wasserstoffbildung, Risiko der Wasserstoffversprödung hochfester Stähle
- E: Verbund zwischen Bewehrungsstahl und Beton wird vermindert

Bild 4.3-26: Korrosionsbedingungen für Stahl im Beton in Abhängigkeit vom Chloridgehalt und vom Potential, nach Pedferri /20/

Der Schutz einer korrodierenden Bewehrung mit einem ausgeprägten örtlichen Angriffsbild erfordert jedoch Schutzpotentiale im Bereich um  $-800$   $\text{mV}_{[\text{MnO}_2]}$ , die auch das Wachstum vorhandener Löcher sicher verhindern. Mit der Spritzverzinkung konnte ein derartig niedriges Potential aber in keinem Fall erreicht werden. Das folgt schon daraus, dass an den Zinkschichten in Abhängigkeit von der Chloridkonzentration lediglich freie Korrosionspotentiale zwischen  $-500$  und  $-800$   $\text{mV}_{[\text{MnO}_2]}$  gemessen wurden, so dass sich das einstellende Mischpotential in jedem Fall in der Zone B bewegt.

Die Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen werden durch den vorgefundenen Zustand der Bewehrung nach 30-monatiger Auslagerungszeit im wesentlichen bestätigt. An der ausgebauten Bewehrung wurde an allen Proben ein Korrosionsangriff festgestellt. Die Abtragsraten lagen zwischen  $75 \text{ g/m}^2\text{a}$  und  $325 \text{ g/m}^2\text{a}$ . Ein signifikanter Unterschied zwischen geschützter und ungeschützter Bewehrung ist entweder nicht vorhanden oder kann nicht unmittelbar auf einen kathodischen Schutz durch die Spritzverzinkung zurückgeführt werden. Lediglich bei Proben mit 4 % Chlorid wurde durch die Applikation der Spritzverzinkung auch ohne abdichtende Beschichtung eine deutliche Verminderung der Korrosionsrate erreicht. Mit der Applikation des Oberflächenschutzsystems wird bei Proben mit 10 mm Betondeckung der ansonsten ungehinderte Feuchtigkeitzutritt praktisch vollständig unterdrückt und gleichzeitig die Sauerstoffdiffusion erschwert. Aus den Feuchtigkeitsmessungen ist bekannt, dass die Proben mit OS im Bereich zwischen 1 und 2 cm Tiefe über den gesamten Versuchszeitraum ein nahezu unverändertes, sehr geringes Feuchteangebot im Bereich zwischen 3 und 4 M.-% vorlag. Deshalb ist in diesen Fällen auch ohne zusätzlichen kathodischen Schutz von einer deutlichen Verminderung der Korrosionsrate auszugehen.

Bei einer Betondeckung von 40 mm treten über den Versuchszeitraum bei Freibewitterung keine Feuchtigkeitsänderungen auf. Dies ist unabhängig von der Applikation eines Oberflächenschutzsystems. Allerdings ist die Feuchtigkeit in diesem Bereich mit 5 bis 6 M.-% deutlich höher. Deshalb hat die abdichtende Oberflächenbeschichtung bei einer Betondeckung von 40 mm unter den gegebenen Bedingungen und Versuchszeiträumen keinen Einfluss auf das Korrosionsgeschehen an der Bewehrung. Eine Wirksamkeit der Spritzverzinkung konnte anhand der ausgebauten Bewehrung für Proben mit Chloridgehalten von 1 und 2,5 % nicht nachgewiesen werden. Für Proben mit 4 % Chlorid ist eine solche Schutzwirkung erreicht worden. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen der elektrochemischen Messungen.

Bei der Bewertung der Versuchsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass der Unterschied zwischen dem Zeitraum der Vorkorrosion von 14 Monaten und der Auslagerungszeit nach Applikation des Oberflächenschutzsystems (einschließlich Spritzverzinkung) mit weiteren 16 Monaten relativ gering ist. Durch die Kombination von Oberflächenschutzsystem und kathodischem Korrosionsschutz wird jedoch ein sofortiges „einfrieren“ des nach 14 Monaten erreichten Korrosionszustandes erwartet. Demnach sollte der Korrosionsangriff an den Proben mit OS immer etwa 50 % geringer ausfallen, als an den Proben ohne OS, die mehr als die doppelte Zeit (30 Monate) ungeschützt ausgelagert waren. Dies wurde jedoch nicht in jedem Fall erreicht.

Das Problem der Blasenbildung am Oberflächenschutzsystem muss in einem ursächlichen Zusammenhang mit der Höhe der Schutzströme bzw. des vorhandenen Chloridgehaltes stehen. Eine Analyse des Gasinhaltes der Blasen gelang nicht, da die Probennahme aufgrund der Eigenschaften des Schutzsystems nicht möglich war. Die später an Probelöcken mit 1 % Chlorid durchgeführten Untersuchungen mit Fremdstrombeaufschlagungen in vergleichbarer Größenordnung führten zu keiner Blasenbildung an diesen Proben. Deshalb konnte die Ursache für die Blasenbildung nicht weiter eingegrenzt werden. Aufgrund der beobachteten Probleme ist das Oberflächenschutzsystem in Kombination mit der Spritzverzinkung auf Verkehrsflächen nicht einsetzbar.

#### **4.3.7 Zusammenfassung**

Bei der vorhandenen ausgeprägten Vorkorrosion der Stahlbewehrung konnte die Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes durch thermische Spritzverzinkung auf der Betonoberfläche auf der Grundlage elektrochemischer Kennwerte überwiegend nicht nachgewiesen werden. Das 100 mV Kriterium wurde lediglich für die Proben mit 4 M.-% Chlorid erfüllt. Bei den Schutzpotentialen lagen die Werte zwischen  $-400$  und  $-600$  mV  $[\text{MnO}_2]$ , so dass anzustrebende Werte im Bereich von  $-800$  mV  $[\text{MnO}_2]$  in keinem Fall erreicht wurden. Die für den kathodischen Korrosionsschutz typischen Stromdichten wurden ebenfalls nur an den Proben mit 4 M.-% Chlorid erreicht. Die Ursachen dafür liegen in der Deaktivierung der Zinkschichten bei niedrigen Chloridgehalten, in hohen Betonwiderständen durch Austrocknung und einer dadurch bedingten sehr geringen Treibspannung begründet. Vermutlich liegt auch der pH-Wert an der Phasengrenzfläche Beton/Zink nicht mehr in einem Bereich, bei dem das Zink aktive Korrosion zeigt.

Eine ausreichende Schutzwirkung wird nur dann erreicht, wenn eine Deaktivierung der Zinkbeschichtung durch extrem hohe Chloridgehalte verhindert wird oder eine signifikante Vorkorrosion der Bewehrung ausgeschlossen werden kann. Ohne Vorkorrosion verhindert der Kontakt der Bewehrung mit der Zinkbeschichtung die Überschreitung kritischer Potentialwerte, die für die Auslösung der Korrosionsprozesse notwendig sind. Dieser Zustand entspricht nach DIN EN 12 696-1 der kathodischen Vorbeugung und würde in der Baupraxis einer Situation örtlicher Depassivierung ohne großflächige aktive Anodenbereiche der Bewehrung entsprechen. Für die Übertragung der Forschungsergebnisse auf praktische Anlagen muss berücksichtigt werden, dass in Bauwerken meistens keine gleichmäßige Chloridverteilung vorliegt und damit zunächst nur mit kleinflächigen Anoden zu rechnen ist.

## 4.4 Zusatzuntersuchungen zur Phasengrenze Zink/Beton (MPA)

### 4.4.1 Probekörper

Für die Untersuchungen standen drei 1994 betonierte, bewehrte und spritzverzinkte Platten (1 m<sup>2</sup> Stirnfläche) zur Verfügung. Maße und Anordnung der Bewehrung und der aufgetragenen Spritzverzinkung sind in Bild 4.4-1 dargestellt. Der Beton wurde als B 25 mit einem Zusatz von 3 % Chlorid/Zementgewicht als Natriumchlorid hergestellt und seit 1994 senkrecht stehend im Freien gelagert. Platte 1 dient als Referenzplatte ohne leitende Verbindung von Verzinkung und Bewehrung, an Platte 2 ist Verzinkung und Bewehrung kurzgeschlossen. Platte 3 wurde für Versuche mit Fremdstrom verwendet. Außerhalb dieser Versuche, die insgesamt 900 Tage dauerten, waren Verzinkung und Bewehrung stets kurzgeschlossen. Angaben zur Vorgeschichte der Versuchskörper und die Ergebnisse erster Messungen sind in /21/ veröffentlicht.

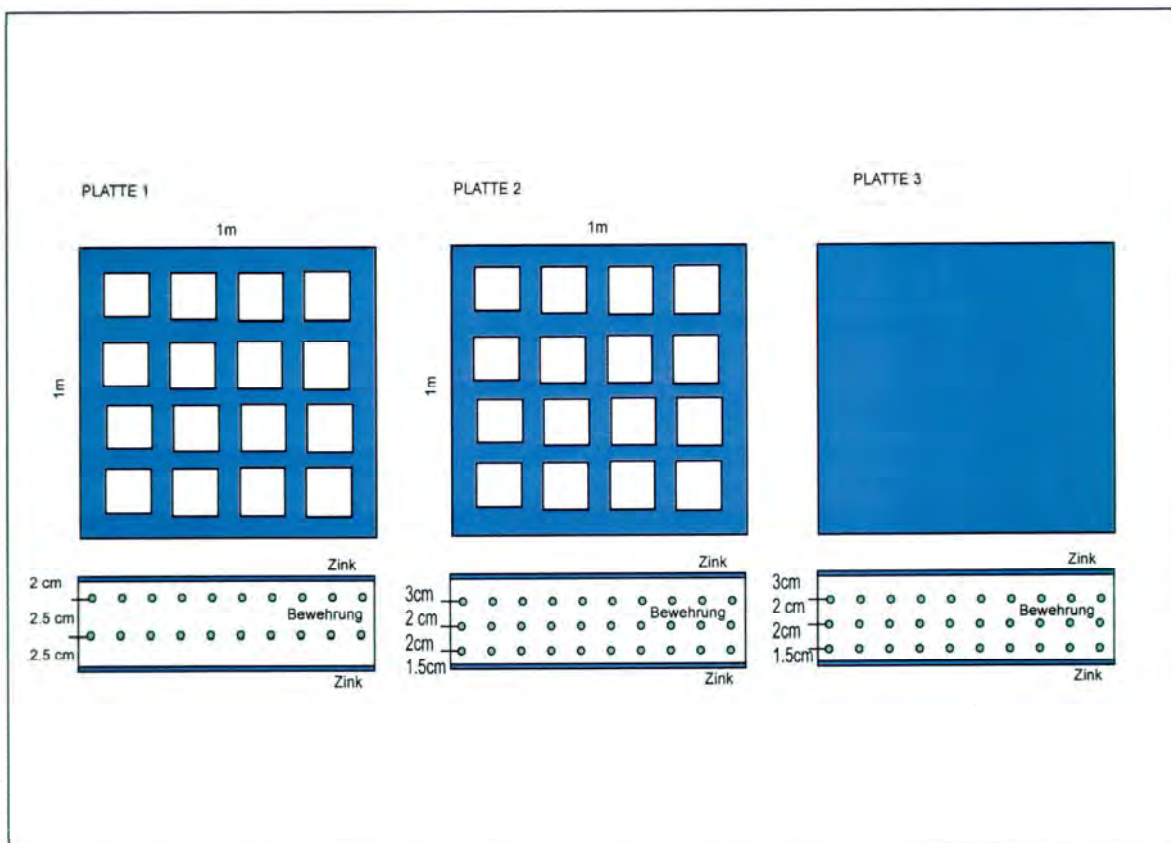


Bild 4.4-1: Probekörper (seit 1994 im Freien ausgelagert)



## **4.4.2 Untersuchungen**

### **4.4.2.1 Vorbereitende Messungen vor Ort**

Zur Vorbereitung der ursprünglich im Rahmen dieses Projektes geplanten Installation des Schutzsystems im Parkhaus Schwäbisch Hall wurden an zwei Testfeldern (Parkboxen 86-88 und 89-91) Potentialfeldmessungen und Widerstandsmessungen (Wechselstromwiderstand zwischen aufgesetzter Elektrode und Bewehrung) durchgeführt. Vor der Messung wurde die Oberfläche durch Besprühen mit Leitungswasser angefeuchtet.

### **4.4.2.2 Messungen an ausgelagerten Probekörpern**

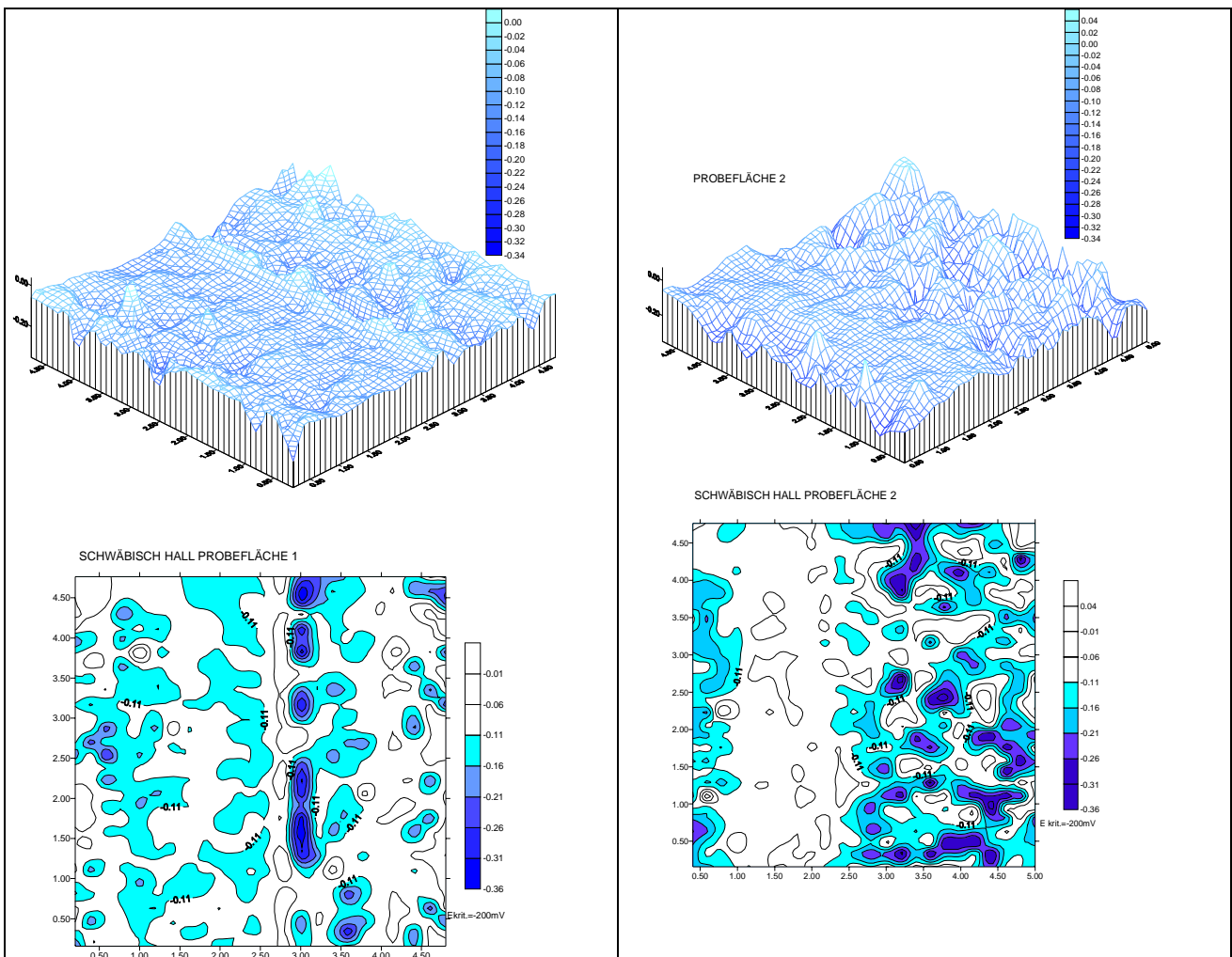
An spritzverzinkten Betonplatten wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nach inzwischen 8 Jahren Auslagerung folgende Versuche und Untersuchungen durchgeführt:

- Ermittlung des Ruhepotentials von Zink und Bewehrung an allen Zinkschichten und Bewehrungslagen nach Öffnen der elektrischen Verbindungen zwischen Zink und Bewehrung.
- Installation einer galvanostatisch arbeitenden Fremdstromanlage zum KKS mit einer maximalen Spannung von 70 V an Platte 3 und Registrierung von Potential der Bewehrung (mittels Kalomelelektrode, später Mangan/Manganoxidelektrode) und Strom. Der Strom wurde so begrenzt, dass ein Schutzpotential von  $-800$  mV (GKE), in Kurzzeitversuchen auch  $-900$  mV erreicht wird. Dies entspricht etwa dem Anfangswert im Kurzschluss mit Zink (vgl. /21/). Die Strombegrenzung musste dazu auf Werte zwischen etwa 200 und 300 mA eingestellt werden.
- Feststellung des tiefenabhängigen Chloridgehaltes anhand von Bohrmehlproben.
- Ermittlung der Haftzugfestigkeit des Zinküberzuges.
- Entnahme von Bohrkernen zur Ermittlung des Korrosionszustandes von Verzinkung und Bewehrung.
- Untersuchung von Korrosionsprodukten des Zinks insbesondere an der Phasengrenze Zink/Beton und innerhalb der Zinkschicht mittels REM, EDX und Röntgenbeugung.
- Messungen zur „Reaktivierung“ der Zinkschicht durch Polarisation mit Gleichstrom, wobei Zink als Kathode geschaltet wurde.

## 4.4.3 Ergebnisse

### 4.4.3.1 Vorbereitende Messungen vor Ort

Die Ergebnisse der Potentialfeldmessung an den beiden Probeflächen sind in Bild 4.4-2 dargestellt. Das kritische Potential wurde jeweils mit der „Knickpunktmethod“ aus der Summenhäufigkeit ermittelt. Nach diesem Kriterium bestimmte Korrosionsbereiche sind in der Darstellung dunkel markiert, heller schattierte Bereiche sind als „Übergangsbereich“ zu interpretieren.



**Bild 4.4-2:** Ergebnis der Potentialfeldmessung auf Probefläche 1 und 2 im Parkhaus Schwäbisch Hall

Die Widerstandsmessungen ergaben Werte zwischen 4,53 und 0,36 k $\Omega$ , wobei Werte zwischen 0,36 und 0,43 Korrosionsbereichen der Potentialfeldmessung entsprechen. In Bereichen ohne Korrosionsanzeige liegen die Widerstände typischerweise um 3 k $\Omega$ .

### 4.4.3.2 Messungen an ausgelagerten Probekörpern

#### 4.4.3.2.1 Ruhepotentiale

Die Ergebnisse einer Ruhepotentialmessung im Herbst 2002 sind in Bild 4.4-3 dargestellt. Die Werte liegen alle unterhalb  $-200$  mV (gegen die gesättigte Kalomelektrode mit  $E = +245$  mV NHE) und unterschreiten  $-350$  mV nicht. Es fällt auf, dass sich die Ruhepotentiale von Zink und Bewehrung nur geringfügig unterscheiden. An Probe drei, die zeitweilig mit Fremdstrom beaufschlagt war, werden die höchsten Werte festgestellt.

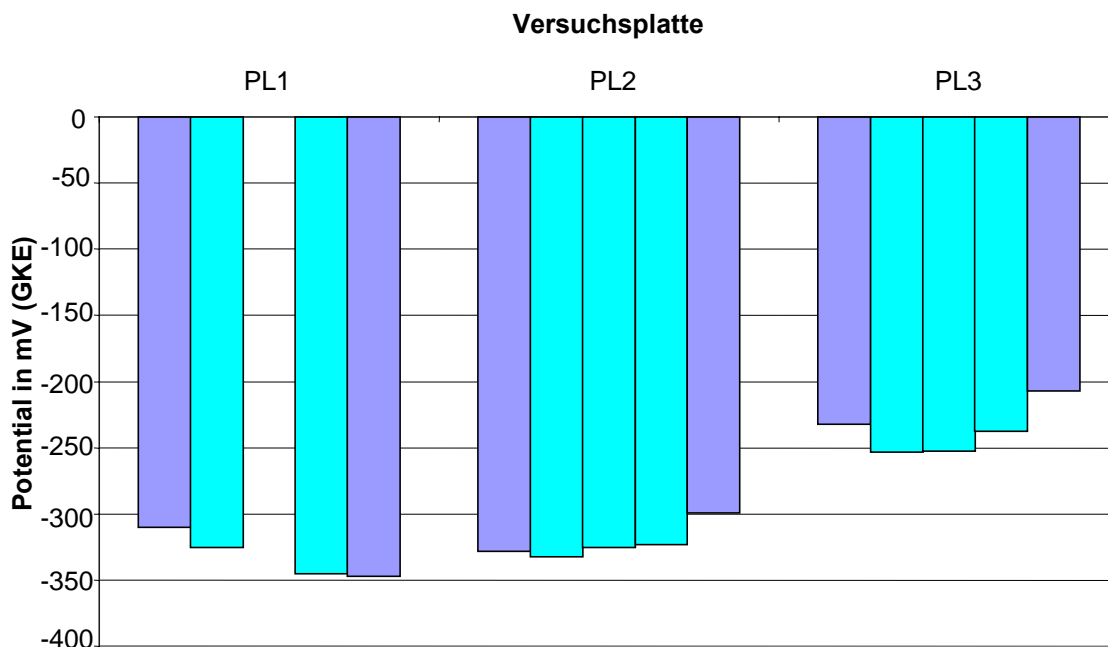
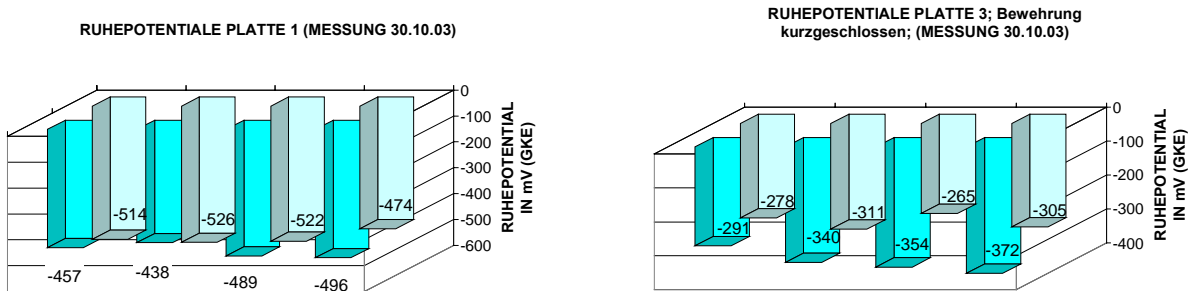
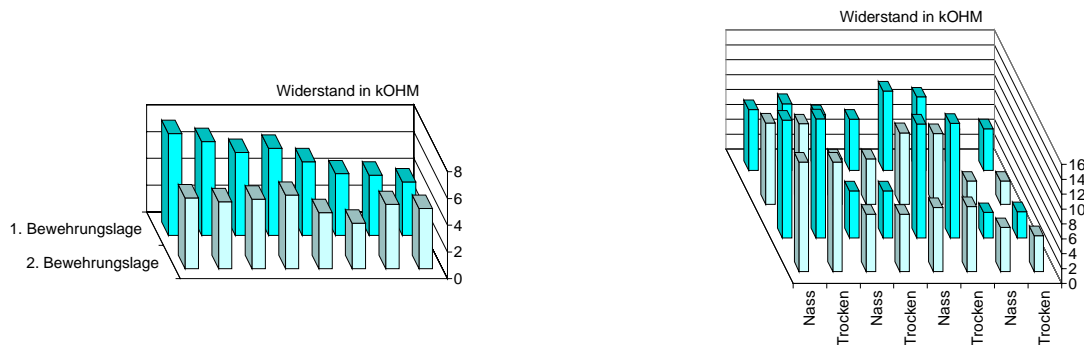


Bild 4.4-3: Ruhepotentiale von Zink (dunkel) und Bewehrung (hell) nach 8 Jahren Auslagerung im Freien

Messungen aus dem Herbst 2003, wobei mehrere, gleichmäßig auf den Platten verteilte Messpunkte gewählt wurden, finden sich in Bild 4.4-4, Widerstandsmessungen (zwischen aufgesetzter Elektrode und Bewehrung nach der „2-Punkt-Wenner-Methode“) in Bild 4.4-5. An Platte 1, an der zu keiner Zeit eine leitende Verbindung zwischen Zink und Bewehrung bestand, wurden durchweg Potentiale unterhalb  $-430$  mV (gegen die Kalomelektrode) gemessen, an der kathodisch (durch Zink-Kontakt und zeitweilig mit Fremdstrom) geschützten Platte finden sich höhere Potentiale zwischen  $-265$  und  $-372$  mV (GKE).



**Bild 4.4-4:** Ergebnisse der Potentialmessung an der Bewehrung (ohne Kontakt zu Zink). Platte 1 links, Platte 3 rechts

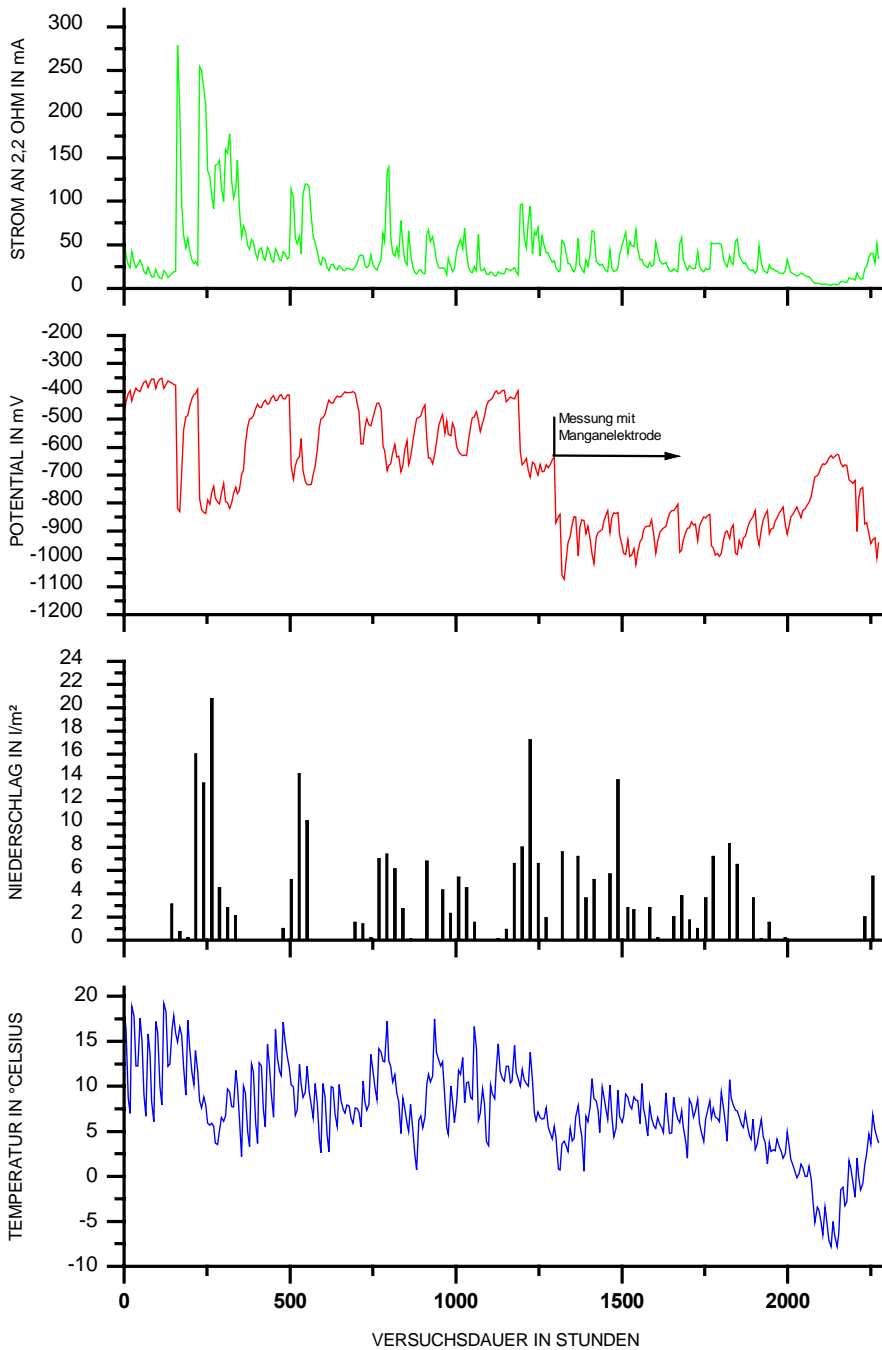


**Bild 4.4-5:** Ergebnisse der Widerstandsmessung. Platte 1 links, Platte 3 rechts

#### 4.4.3.2.2 Potential – und Stromverlauf bei kathodischem Schutz

Bild 4.4-6 zeigt den Verlauf von Strom und Bewehrungspotential von Platte 3 nach Anschluss der Fremdstromanlage zusammen mit den Wetterdaten Temperatur und Niederschlagsmenge in dem Versuchszeitraum. Es ist zu erkennen, dass das Schutzpotential nur nach Befeuchtung erreicht wird. An trockeneren Tagen ist die Spannung von 70 V nicht ausreichend, um einen wirksamen Schutzstrom aufrecht zu erhalten. Die Potentialwerte steigen in diesem Zustand bis etwa  $-350$  mV (GKE) an, ein Wert, der im Bereich der Ruhepotentiale liegt.

**SCHUTZSYSTEM ZINK**  
**FREIBEWITTERT KATHODISCHER SCHUTZ**



**Bild 4.4-6:** Versuchskörper 3 mit kathodischem Schutz: Strom, Potential der Bewehrung und Wetterdaten

#### 4.4.3.2.3 Chloridverteilung

Die Analyse von Bohrmehl aus verschiedenen Tiefen ergibt die in Bild 4.4-7 dargestellten Werte. Insgesamt ist der Chloridgehalt von 3 auf unter 2,5 % abgesunken. Ein Gradient des Chloridgehaltes über die Tiefe kann nicht eindeutig festgestellt werden.

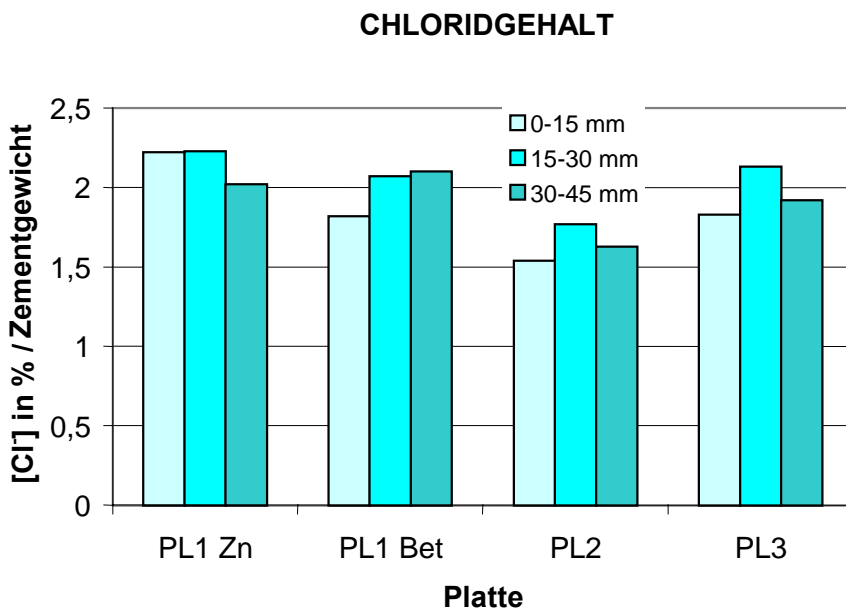
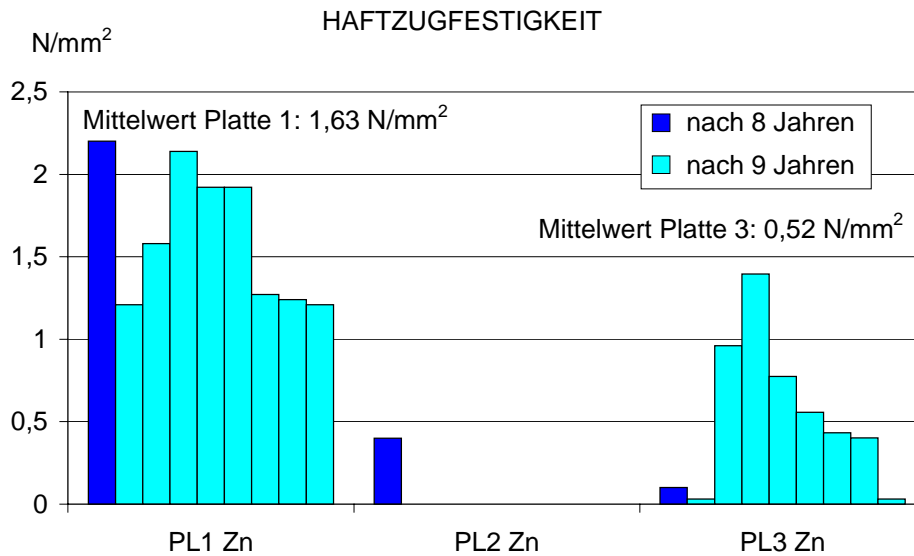


Bild 4.4-7: Chloridgehalt des Betons (aus Bohrmehlproben) in unterschiedlicher Tiefe (Zn = unter Zinkschicht, Bet = unverzinkte Fläche)

#### 4.4.3.2.4 Haftung der Zinkschicht

Die Haftung der Zinkschicht auf Beton unterscheidet sich deutlich an den drei Versuchskörpern. Bild 4.4-8 zeigt die nach 8 und nach 9 Jahren der Auslagerung an den Platten gemessenen Haftzugfestigkeiten. Nach 9 Jahren wurden die Haftzugfestigkeiten nur an den Platten 1 und 3 bestimmt.



**Bild 4.4-8:** Haftzugfestigkeit der Zinkschichten nach 9 Jahren  
Auslagerung im Freien

Während der Referenzkörper 1 eine ausgezeichnete Haftung aufweist, ist bei Probe 3 ein Abfall auf rund 32 % im Mittelwert festzustellen. Die niedrigste Haftung der mit Fremdstrom beaufschlagten Probe 3 liegt mit etwa 0,03 N/mm<sup>2</sup> nahe der Ablösung der Schicht. Entsprechend erfolgte die Trennung bei Probe 1 innerhalb des Betons, bei den Proben 2 und 3 ist hingegen eine weißliche Zwischenschicht zu erkennen (Bild 4.4-9 und -10). Zusammensetzung und Aufbau dieser Schicht wurden untersucht, worauf später eingegangen wird.





Bild 4.4-9: Haftzugstempel, Platte 1



Bild 4.4-10: Haftzugstempel, Platte 3

#### 4.4.3.2.5 Korrosionszustand der Bewehrung und der Zinkschicht

Die mit den Bohrkernen (Bild 4.4-11) entnommenen Bewehrungsabschnitte sind in den Bildern 4.4-12 und -13 wiedergegeben. Alle entnommenen Bewehrungsabschnitte lassen Korrosionserscheinungen erkennen. Die Bewehrung aus Probekörper 1 ist erkennbar stärker angegriffen, als Proben aus den Platten 2 und 3. Hier ist bereits ausgeprägte Rissbildung im umgebenden Beton zu erkennen (Bild 4.4-11). Systematische Unterschiede nach Bewehrungslage bzw. Betonüberdeckung können, zumindest an den wenigen entnommenen Abschnitten nicht festgestellt werden.



Bild 4.4-11: Aus den Probekörpern entnommene Bohrkern (Links: Platte 1, Mitte: Platte 2, Rechts: Platte 3)

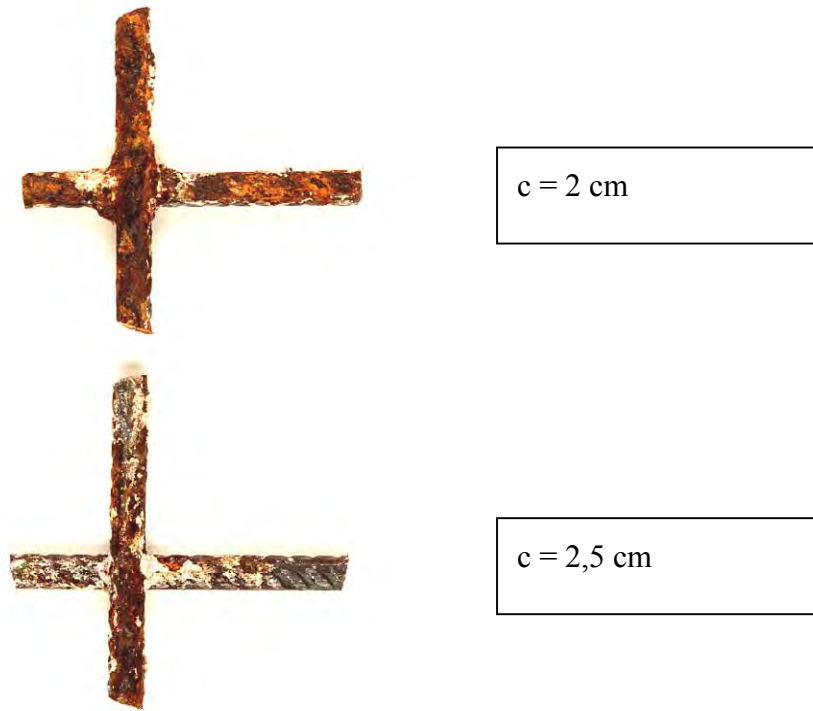


Bild 4.4-12: Ausgebaute Bewehrung aus Prüfkörper 1

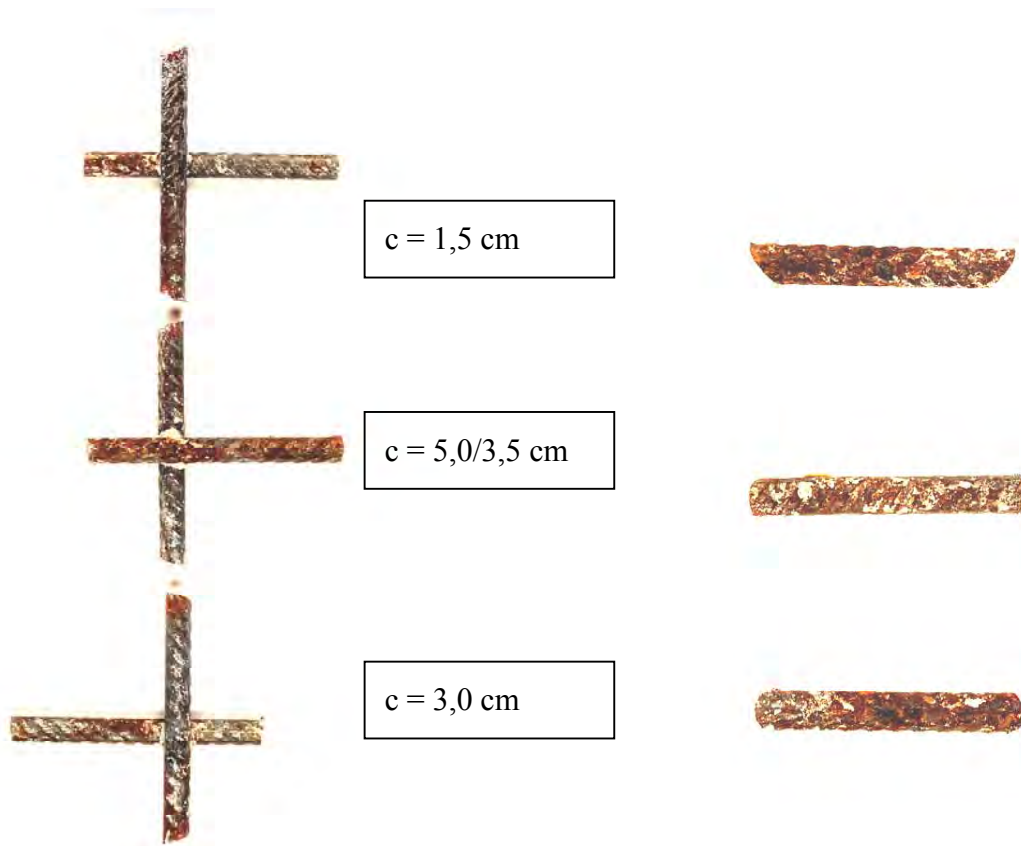
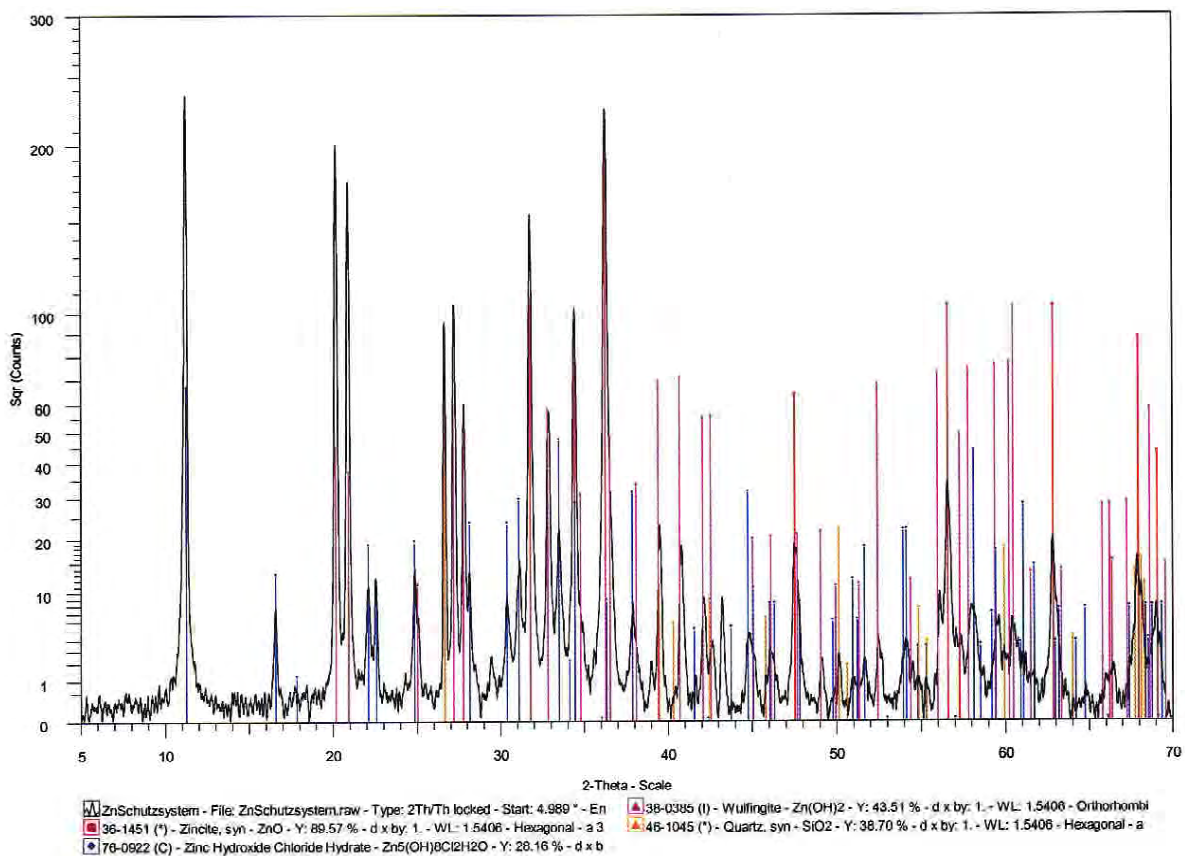


Bild 4.4-13: Ausgebaute Bewehrung, links Prüfkörper 2, rechts Prüfkörper 3

Die Zinkschicht zeigt auf der Außenseite ein fleckig-graues Aussehen. Die betonseitige Oberfläche, die sich bei den Probekörpern 2 und 3 mit geringer Kraft freilegen lässt (vgl. Haftzugversuche), ist mit einer hellen Schicht belegt, die im wesentlichen aus Korrosionsprodukten des Zinks besteht (Bild 4.4-14). Nachgewiesen werden kann hier neben Zinkoxid und Hydroxid auch ein basisches Zinkchlorid. Die Zinkschicht ist an allen Proben noch weitgehend erhalten, weist jedoch nahe der Grenzfläche zu Beton häufig oberflächenparallele Risse auf, die mit Korrosionsprodukten gefüllt sind.



**Bild 4.4-14:** Röntgenbeugungsspektrum der Korrosionsprodukte von der Grenzfläche Zink/Beton (Probekörper 3, Probe aus Haftzugversuch – vgl. Bild 4.4-10)

#### 4.4.3.2.6 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und Mikroanalyse an Spritz-Zinkschichten

Typische Befunde zu Korrosion und Korrosionsprodukten der Zinkschicht von 8-jährigen, bewitterten Versuchskörpern sind zusammen mit Aufnahmen neuwertiger Schichten und einer ebenfalls 8 Jahre frei bewitterten isolierten Zinkschicht gleicher Fertigung im Anhang B in den Bildern B1 bis B26 zusammengestellt.

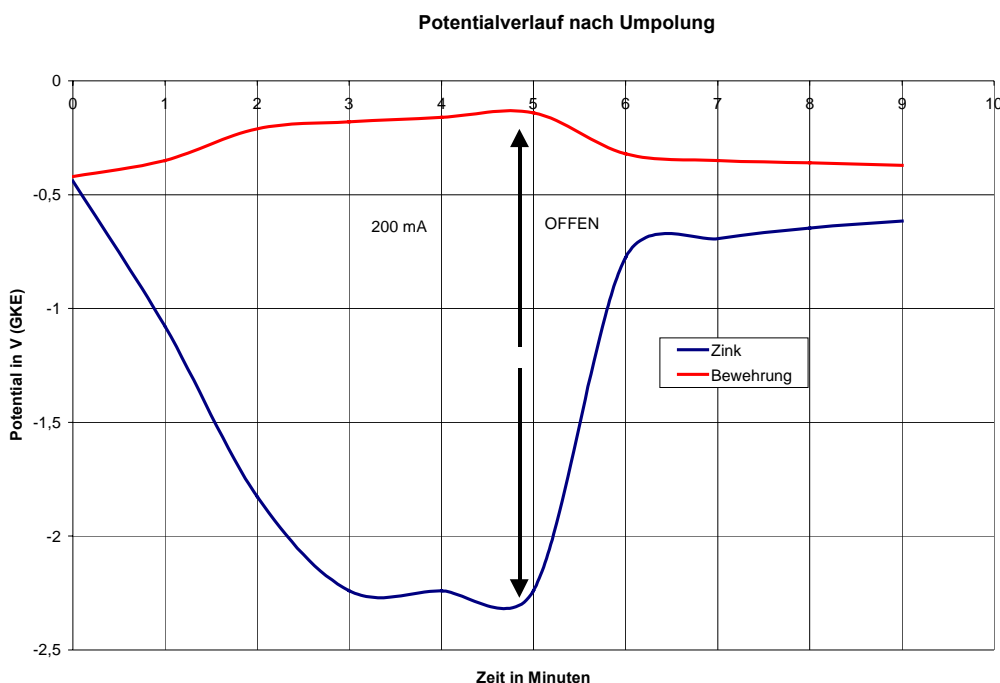
Alle bewitterten Schichten zeigen deutliche „innere Korrosion“, erkennbar an mehr oder weniger deutlich kristallinen Korrosionsprodukten in den Poren zwischen den Zinkpartikeln.

Sehr feine, nadelartige und stark „verfilzte“, blättrige Kristalle (Bilder B11 und B12) finden sich sowohl in der „frei“ korrodierten, als auch in den auf Beton aufgetragenen Schichten. Ausschließlich bei Betonkontakt werden zwei Erscheinungsformen gefunden:

- die in Bild B21 dargestellten kristallinen Zinkverbindungen, für die in der EDX-Analyse (Bild B28) neben Zink und Sauerstoff auch ein Chloranteil von etwa 10 Atom% nachgewiesen wird und
- plättchenförmige Kristalle (Bild B20), die Calcium (ca. 15 Atom%, vgl. Analyse in Bild B27) enthalten.

#### 4.4.3.2.7 Versuche zur „Reaktivierung“ der Zinkschicht

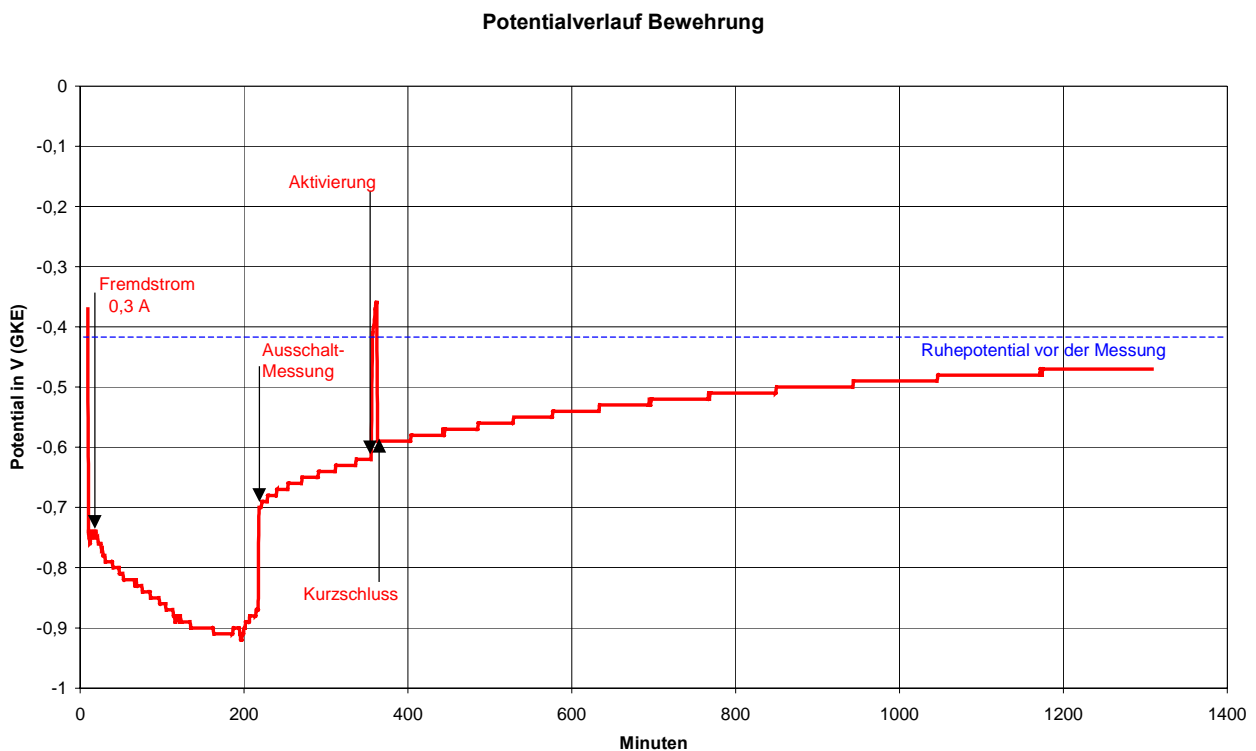
Bei Umpolung des Schutzstromes wird die Zinkschicht kathodisch, die Bewehrung hingegen anodisch polarisiert. Das Ergebnis eines solchen Versuches (bei feuchter Witterung) ist in Bild 4.4-15 dargestellt. Nach Aufprägen eines Stromes von 200 mA steigt das Potential der Bewehrung innerhalb 5 Minuten um etwa 250 mV an, während das Potential der Zinkelektrode um fast 2 V negativer wird. Der (integrale) Polarisationswiderstand von Anode und Kathode unterscheidet sich somit um ca. eine Zehnerpotenz. Nach Ausschalten des Stromes nähern sich die Werte innerhalb von wenigen Minuten auf ca. 200 mV an.



**Bild 4.4-15:** Potentialverlauf bei Polarisation (Zn als Kathode) mit 200 mA („Aktivierung“)



Kathodischer Schutz bis zu Potentialen um  $-900\text{ mV}$  (GKE) war danach (Bild 4.4-16) mit Spannungen von maximal  $7\text{ V}$  bis zu einem Schutzpotential von  $-900\text{ mV}$  möglich. Im Kurzschluss Zink/Bewehrung ist hingegen bereits nach etwa einem Tag kein wirksamer Schutz vorhanden, da sich das Mischpotential dem Ruhepotential der korrodierenden Bewehrung stark annähert (Bild 4.4-16).



**Bild 4.4-16:** Potentialverlauf der Bewehrung bei kathodischem Schutz mit Fremdstrom, Ausschaltmessung und Potentialverlauf im Kurzschluss Zink/Bewehrung nach kurzer „Aktivierung“

#### **4.4.4 Zusammenfassung**

Nach neun Jahren Auslagerung im Freien sind die freien und auf Beton aufgetragenen Zinkschichten noch weitgehend und vollflächig erhalten. Die porösen Schichten zeigen alle „innere“ Korrosion, die sich in der Anwesenheit von Korrosionsprodukten in den Poren und (bei Kontakt mit Beton) in der Ausbildung von parallel zur Grenzfläche verlaufenden Rissen äußert. Aus der Dicke der Schicht, die zwischen Beton und Zink gefunden wird, lässt sich schließen, dass der überwiegende Teil des Zinkabtrages an der Grenzfläche Zink/Beton erfolgt ist. Die Zusammensetzung von Korrosionsprodukten, die bei Kontakt mit chloridhaltigem Beton entstehen, weist gegenüber atmosphärischer Korrosion insofern Besonderheiten auf, als kristalline „Nester“ von (wahrscheinlich) Zink-Chlorid-Hydrat und Calciumhydroxozinkat hierfür typisch erscheinen.

Auf die Haftung zwischen Zinkschicht und Beton hat die Freibewitterung vor allem in den Fällen einen nachweisbaren Einfluss, in denen Zink mit der Bewehrung kurzgeschlossen war. Zeitweilige Schaltung als Fremdstromanode verringert die Haftung erheblich.

Die Ruhepotentiale von Zinkschicht und korrodierender Bewehrung sind nach 8 Jahren soweit angeglichen, dass eine kathodische Schutzwirkung ohne Fremdstrom nicht mehr angenommen werden kann. Bei Schaltung als Fremdstromanode macht sich ein zeitlich zunehmender Widerstand bemerkbar, der eine erhebliche Erhöhung der treibenden Spannung erforderlich macht. Dieser lässt sich jedoch, wie „Reaktivierungsversuche“ zeigen, durch kurzzeitige Umpolung der Schutzstromquelle zumindest zeitweise soweit erniedrigen, dass Schutz mit Fremdstrom wieder problemlos möglich wird.

### **4.5 Untersuchungen unter Praxisbedingungen an einem Parkhaus (ibac)**

#### **4.5.1 Allgemeines**

Für das Anlegen einer Probefläche mit dem kombinierten Schutzsystem wurde von der RWTH Aachen das universitätseigene Parkhaus in der Eilfschornsteinstrasse zur Verfügung gestellt. Die Versuchsfläche wurde auf dem obersten freibewitterten Parkdeck im Bereich einer vorhandenen Bauwerksfuge auf einer Fläche von  $16,4 \cdot 2,5 \text{ m}^2$  angelegt. Sie umfasst zwei Stellflächen sowie die dazwischen liegende Fahrspur. Eine Skizze mit Darstellung der Probefläche zeigt Bild 4.5-1.

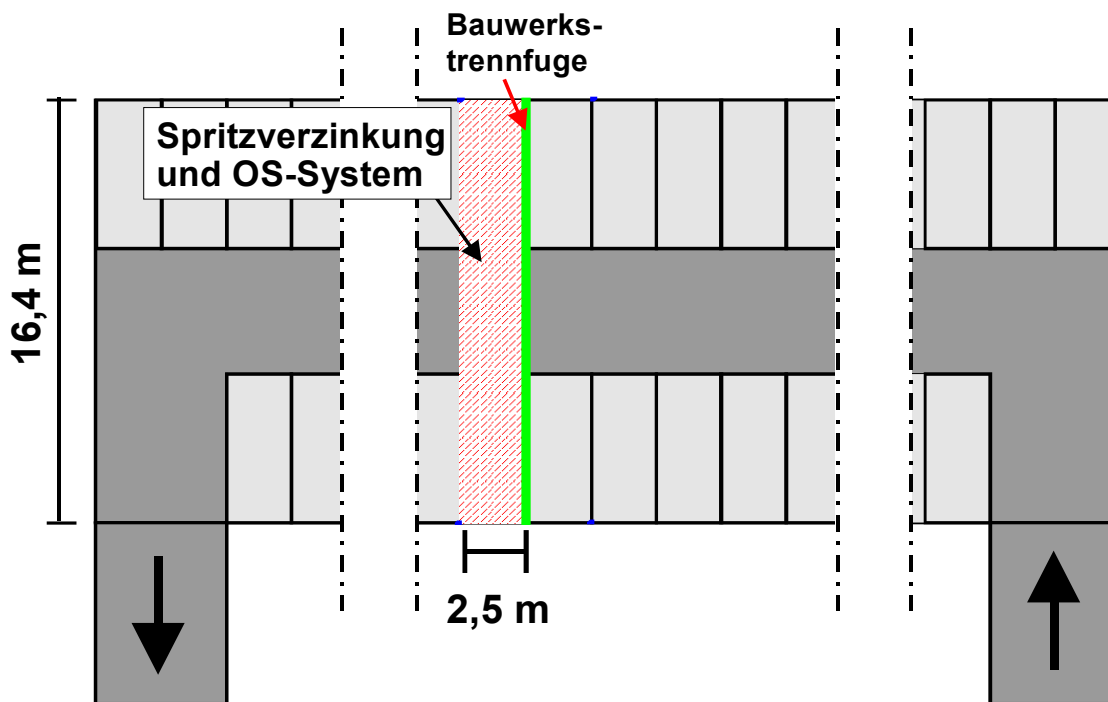


Bild 4.5-1: Skizze der Lage der Probefläche

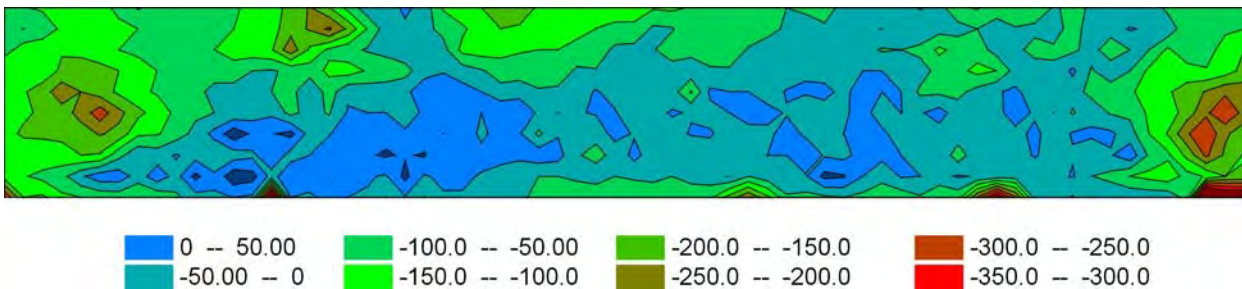
#### 4.5.2 Voruntersuchungen und Vorbereitung der Probeflächen

Da bereits vor ca. 12 Jahren festgestellt wurde, dass große Bereiche der Parkdecks des Parkhauses erhebliche Chloridgehalte und dadurch bedingte Korrosionsschäden aufwiesen, wurde zu dieser Zeit das oberste freibewitterte Parkdeck mit einem OS-System versehen, die übrigen Decks wurden jedoch nicht beschichtet und zeigen mittlerweile so starke Korrosionsschäden (Delamination der Betondeckung auf ca. 2/3 der Fläche), dass eine Instandsetzung mit dem untersuchten Kombinationssystem nicht mehr infrage kommt. Bei dem oberen Freideck dagegen waren in den Voruntersuchungen keine Delaminationen feststellbar.

Vor Abtrag des vorhandenen OS-Systems wurden in einem Raster Linienscans mit Hilfe eines Bewehrungssuchgerätes (Hilti-Ferroskan) durchgeführt, um die Betondeckung und die Oberfläche der vorhandenen Bewehrung festzustellen. Dabei wurde eine sehr gleichmäßige Betondeckung von ca. 3,0 bis 4,5 cm zur ersten Bewehrungslage festgestellt. Anhand der georteten Bewehrungsstäbe und der ermittelten Bewehrungsdurchmesser konnte die Bewehrungsoberfläche der oberen Bewehrungslage im Versuchsfeld zu ca. 16 m<sup>2</sup> abgeschätzt werden.

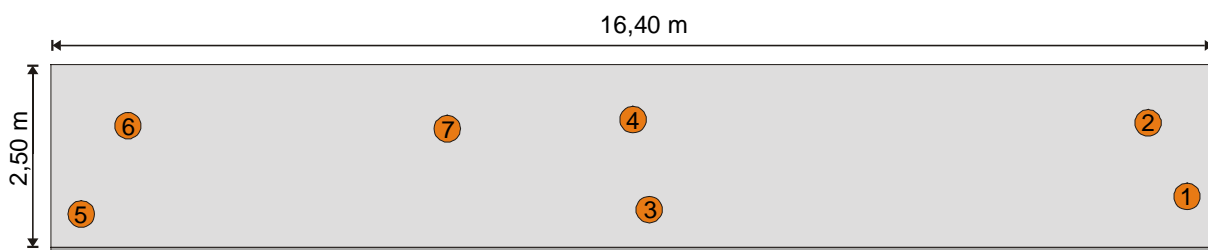
Das vorhandene alte OS-System wurde im Bereich des Versuchsfeldes entfernt und die Betonoberfläche durch Kugelstrahlen gesäubert.

Daraufhin wurde eine Potentialfeldmessung im Versuchsfeld in einem Messraster von  $25 \cdot 25 \text{ cm}^2$  durchgeführt. Die gegenüber einer  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  – Bezugselektrode gemessene Potentialverteilung ist in Bild 4.5-2 dargestellt.



**Bild 4.5-2:** Ergebnisse der Potentialfeldmessung in mV gegen  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (Messraster  $25 \cdot 25 \text{ cm}^2$ )

Sowohl die relativ positiven Potentialwerte als auch die vergleichsweise gleichmäßige Potentialverteilung zeigten dabei keine deutlich erkennbaren Anzeichen für eine Korrosion der Bewehrung im Bereich des Versuchsfeldes. Potentialwerte kleiner  $-350 \text{ mV}$  gegen CSE wurden nur an 3 eng begrenzten Stellen unmittelbar an der Bauwerkstrennfuge gemessen. An 7 verschiedenen Stellen innerhalb des Versuchsfeldes wurden daraufhin tiefengestaffelt Bohrmehlproben entnommen und die Gesamtchloridgehalte mittels potentiometrischer Titration nach Säureaufschluss der Proben bestimmt. Die Lage der Probenentnahmestellen ist in Bild 4.5-3 dargestellt.



**Legende:** KKS-System mit Zink Bohrmehlentnahmeort Nr.3 Bauwerkstrennfuge

**Bild 4.5-3:** Orte der Bohrmehlentnahmen

Die analysierten Bohrmehlproben bestätigten die Ergebnisse der Potentialfeldmessungen. Bei allen Proben wurden nur Chloridgehalte in Höhe eines üblichen Grundchloridgehaltes von Beton festgestellt. Dementsprechend muss in dem untersuchten Bereich von einer vorwiegend passiven oberen Bewehrungslage ausgegangen werden.

### 4.5.3 Eingebaute Sensoren

Vor der Installation des Kombinationssystems wurde die Versuchsfläche mit verschiedenen Sensoren zur Beurteilung der Wirksamkeit des Systems ausgestattet. Aufgrund der geringen Chloridgehalte des vorhandenen Betons wurden zusätzlich an drei Stellen der Fläche Schlitz mit einer Breite und einer Tiefe von jeweils ca. 3 cm und einer Länge von ca. 1,00 m in die Betondeckung gefräst, um zusätzliche Bewehrungsstäbe (Länge 80 cm,  $\varnothing$  8 mm) mit chloridhaltigem Mörtel mit 1, 2 bzw. 3 % Chlorid bezogen auf den Zementgehalt einzubetten. Für die Durchführung von Potential und Depolarisationsmessungen wurden  $\text{MnO}_2$ -Gel-Referenzelektroden (Firma Citec) jeweils unmittelbar an den zusätzlich eingebetteten Bewehrungsstäben sowie an der vorhandenen Bewehrung installiert. Die Lage der Referenzelektrode an der ursprünglichen Bewehrung wurde anhand der Ergebnisse der Potentialfeldmessung im Bereich der niedrigsten Potentiale innerhalb des Versuchsfeldes festgelegt. Bild 4.5-4 zeigt einen der zusätzlichen Bewehrungsstäbe sowie die zugehörige Referenzelektrode vor Entfernen der Schutzkappe und Einbettung in den chloridhaltigen Mörtel.



Bild 4.5-4: Zusätzlich eingebetteter Bewehrungsstab und zugehörige Referenzelektrode (noch mit Schutzkappe) vor dem Einbetten in chloridhaltigen Mörtel

Zur Beobachtung der Austrocknung des Betons wurden insgesamt 6 Multiring-Elektroden mit Temperatursensor in die Oberseite der Versuchsfläche unterhalb des Kombinationsystems eingebettet. Hierzu wurden die Multiring-Elektroden mit Hilfe von Abstandhaltern in vorgebohrten Löchern fixiert und der Hohlraum von ca. 2,5 mm zwischen der Elektrode und der Bohrlochwandung mit einem Ankopplungsmörtel verfüllt (siehe Bild 4.5-5).

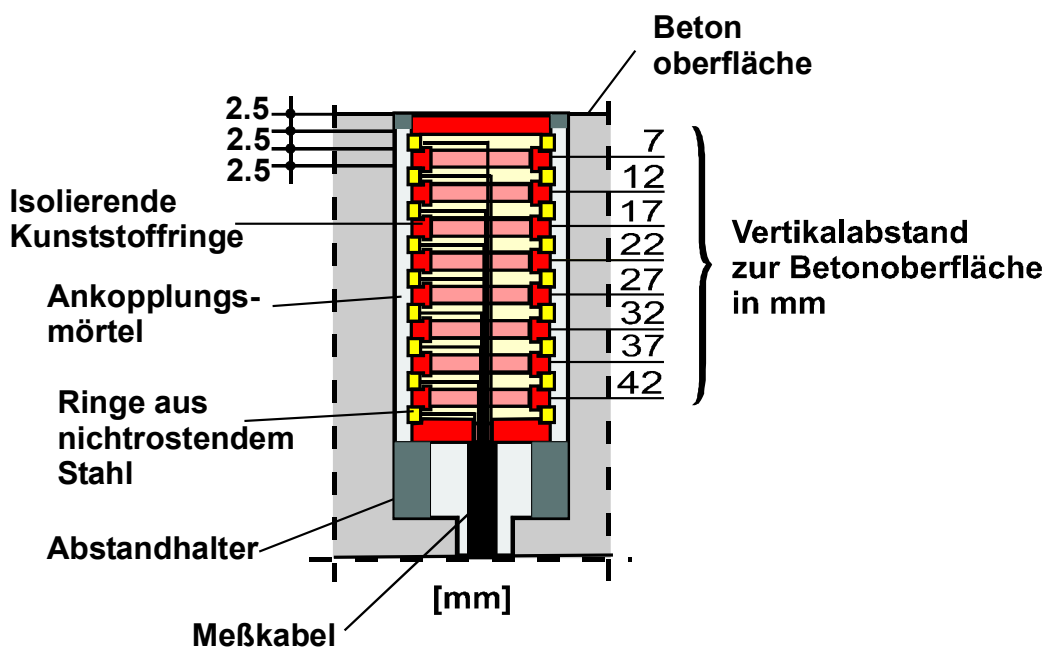
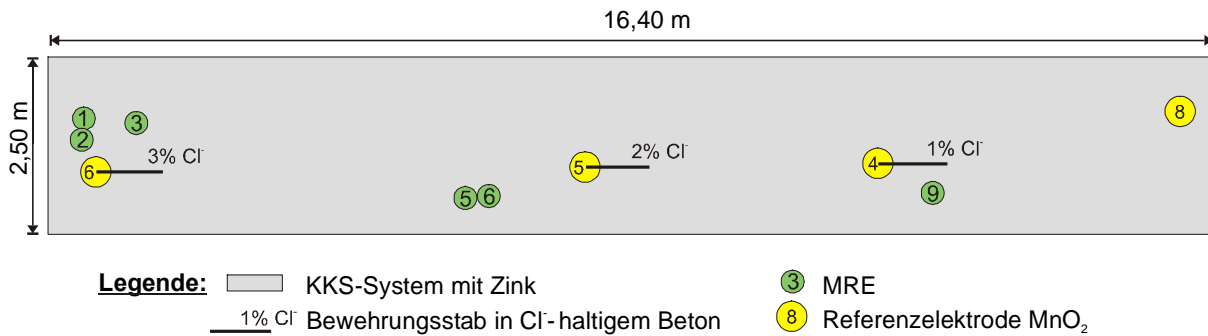


Bild 4.5-5: Skizze einer nachträglich eingebauten Multiring-Elektrode

Grundsätzlich wird bei Multiring-Elektroden, die in dieser Form nachträglich eingebaut werden, vorwiegend der elektrische Widerstand des Ankopplungsmörtels gemessen. Infolge der Gleichgewichtsfeuchtebeziehung zwischen Beton und Ankopplungsmörtel lassen sich daraus dennoch Rückschlüsse auf die Austrocknung des Betons ziehen.

In Bild 4.5-6 ist eine Skizze der Versuchsfläche im Grundriss mit der Platzierung aller eingebauten Sensoren dargestellt.





**Bild 4.5-6:** Grundriss mit Platzierung aller nachträglich eingebauten Installationen

#### 4.5.4 Installation des Kombinationssystems

Nach Installation aller Sensoren wurde die Spritzverzinkung mit einer Gesamtdicke von 0,2 bis 0,3 mm in mehreren Lagen durch Verwendung des Lichtbogenspritzverfahrens aufgetragen. Um eine Emission von Zinkstaub zu vermeiden musste der gesamte Bereich der Versuchsfläche eingehaust und eine Absauganlage installiert werden (siehe Bild 4.5-7).



**Bild 4.5-7:** Auftrag der Spritzzinkschicht

Der elektrische Anschluss der Spritzzinkschicht wurde über drei auf die Betonoberfläche geklebte, mit einem Kabelanschluss versehene Edelstahlplatten ( $\varnothing$  7 cm) hergestellt, die bei dem Auftrag der Zinkschicht mit einer leicht vergrößerten Schichtdicke mit überzogen wurden (siehe Bild 4.5-8). Je eine der Platten wurde ungefähr in der Mitte der beiden Parkplätze, die dritte in der Mitte der Fahrspur angeordnet.

Die elektrische Verbindung zur Bewehrung wurde durch Anschweißen von kurzen mit einem Kabel versehenen Bewehrungsstücken an drei verschiedenen Stellen der Bewehrung hergestellt.



Bild 4.5-8: Anschlussplatten zur Herstellung der elektrischen Verbindung zur Zinkschicht

Als OS-System wurde für das Pilotprojekt das bereits in den Labortests des ibac und der BAM untersuchte System OS-11a-3, bestehend aus Grundierung, Kratzspachtelung, rissüberbrückender Schicht, Verschleißschicht und Deckversiegelung, verwendet. Die Applikation dieses Systems erfolgte unmittelbar nach Beendigung der Spritzverzinkungsarbeiten und dem Entfernen des angefallenen Zinkstaubes.



Bild 4.5-9: links: Abstreifung der Verschleißschicht vor Auftrag der Deckversiegelung  
rechts: abgeschlossene Installation.

#### **4.5.5 Messinstallation**

Die Anschlusskabel des Zinks, der Bewehrung, der in chloridhaltigen Mörtel eingebetteten Stäbe und sämtlicher Referenzelektroden wurden auf der Parkdeckunterseite in einer Anschlussbox, in der durch Steckverbindungen jede gewünschte Kontaktierung zwischen den Anschlusskabeln hergestellt werden kann, zusammengeführt.

Die Strom-, Potential,- und Depolarisationsmessungen wurden einerseits manuell mit Hilfe von Multimetern, andererseits mittels einer automatischen Messeinrichtung mit Datenlogger durchgeführt. Die Messung und Speicherung der Multiring-Elektroden-Widerstände erfolgte ebenfalls automatisiert. Eine Prinzipskizze der gesamten Messeinrichtung zeigt Bild 4.5-10.

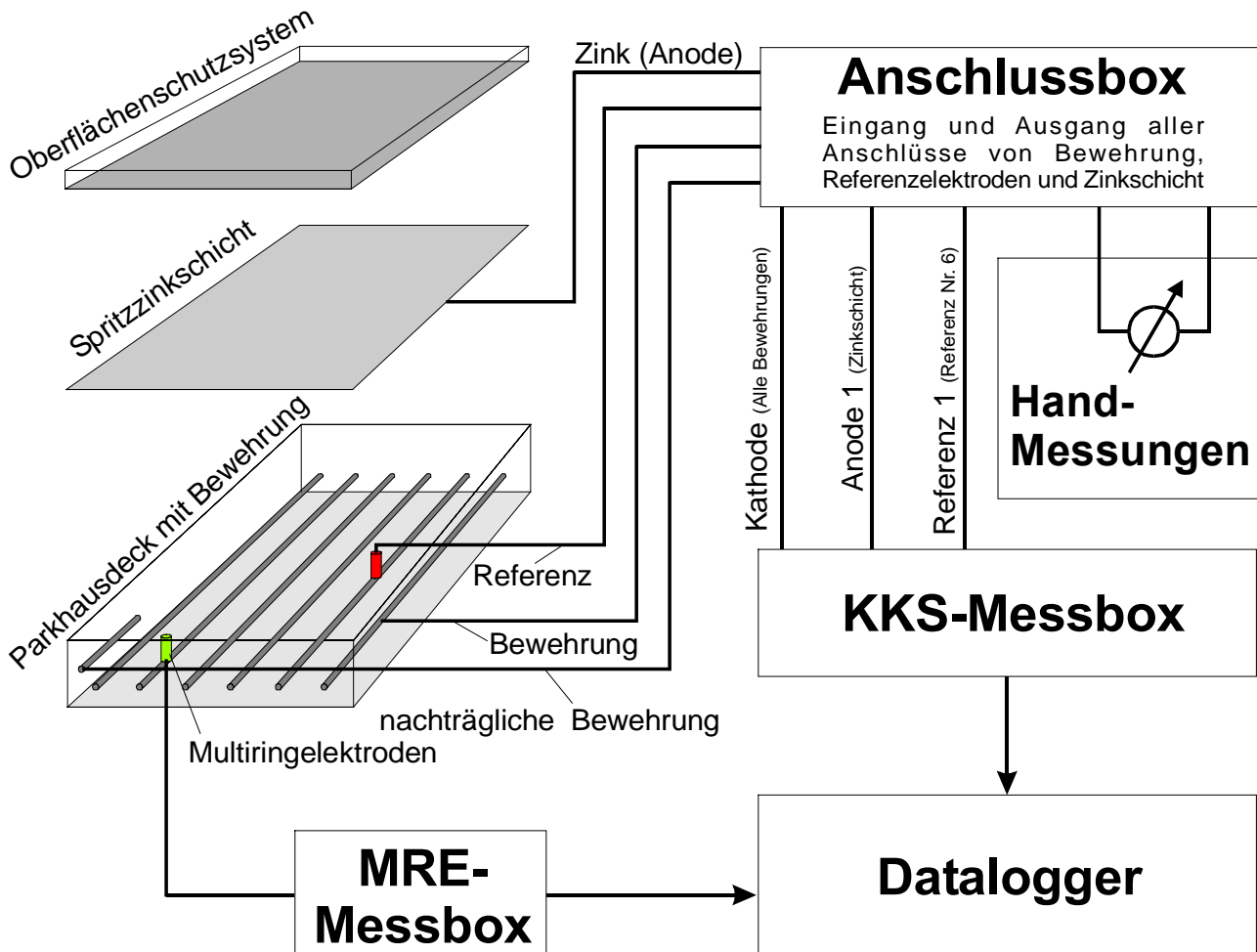


Bild 4.5-10: Prinzipische Skizze der Messeinrichtung für die Versuchsfläche

#### 4.5.6 Versuchsprogramm

Aufgrund des Opferanodenprinzips der Zinkschicht beschränkten sich die Untersuchungen hinsichtlich des kathodischen Schutzes vorwiegend auf das Monitoring des Systems. Hierzu wurde die Spritzzinkschicht elektrisch über die KKS-Messbox mit der gesamten Bewehrung (ursprüngliche Bewehrung und zusätzlich eingebettete Stäbe) über einen Präzisionsmesswiderstand zunächst von 8, später von 0,82 Ohm verbunden. Die automatische Strommessung erfolgte im Abstand von 3 Stunden.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des kathodischen Schutzes der Bewehrung wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Depolarisationsmessungen durchgeführt. Dabei wurden die Ausschaltpotentiale der Bewehrung 1 Sekunde nach Trennung der Verbindung zum Zink gegenüber allen 4 Bezugselektroden gemessen und die weitere Potentialentwicklung über einen Zeitraum von 24 Stunden untersucht. Die drei zusätzlich eingebetteten Bewehrungsstäbe waren während der Depolarisationsmessungen in der Regel mit der übrigen Bewehrung kurzgeschlossen.

Die Messung und Aufzeichnung der Widerstände an den Multiring-Elektroden zur Untersuchung des Austrocknungsverhaltens des Betons erfolgte über den gesamten Versuchszeitraum in halbstündigen Intervallen mit Hilfe der automatischen Messeinrichtung.

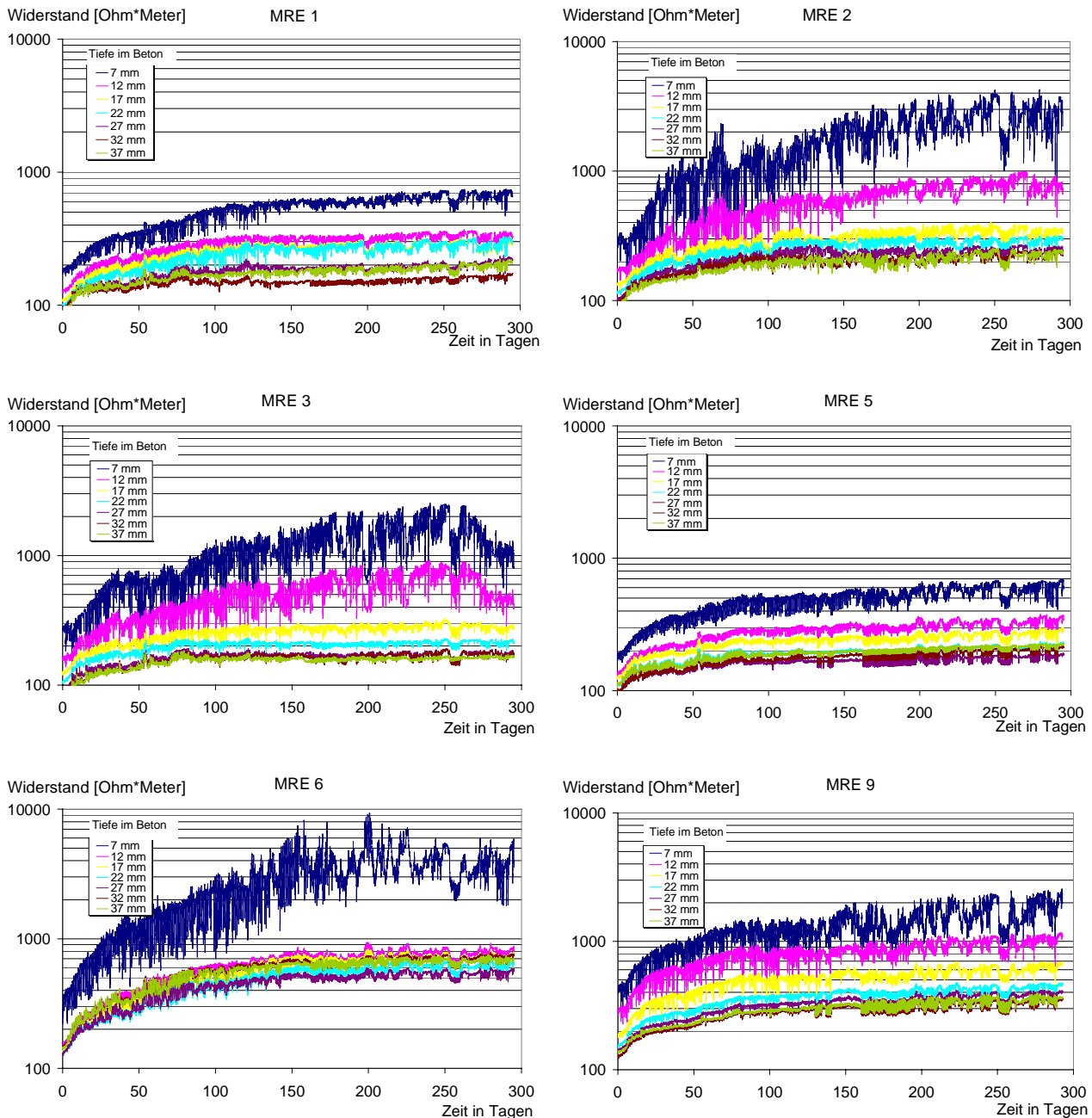
## **4.5.7 Ergebnisse**

### **4.5.7.1 Feuchteentwicklung**

Die Feuchteentwicklung in der Betondeckung unterhalb des Kombinationssystems lässt sich anhand der Ergebnisse der Multiring-Elektrodenmessungen darstellen. Außer von der Betonfeuchte wird der Elektrolytwiderstand des Betons deutlich von der Betontemperatur bestimmt. Der Temperatureinfluss lässt sich dabei mittels der Arrheniusfunktion weitgehend kompensieren.

Zur Auswertung der Rohdaten der MRE-Messung wurden diese zunächst temperaturkompensiert und daraufhin über den für Multiring-Elektroden geltenden Formfaktor von 0,1 m auf spezifische Widerstände umgerechnet. Der Verlauf der so berechneten tiefengestaffelten spezifischen Widerstände ist für die sechs Multiring-Elektroden in Bild 4.5-11 dargestellt.





**Bild 4.5-11:** Mit den Multiring-Elektroden gemessene Entwicklung der tiefengestaffelten spezifische Widerstände (Temperaturkompensation auf 20 °C)

Die Erhöhung der Widerstände innerhalb der Versuchszeit und damit eine Austrocknung des Betons ist deutlich zu erkennen. Der stärkste Anstieg der spezifischen Betonwiderstände ist dabei in den ersten Wochen nach Applikation des Kombinationssystems zu beobachten, doch auch danach steigen die Widerstände langsam aber stetig weiter an. Tendenziell lässt sich weiterhin ein stärkerer Anstieg der Widerstände an den oberen Messringen der erken-



nen, was auf ein Austrocknen des Betons vorwiegend durch das aufgebrachte Kombinationssystem hindeutet. 265 Tage nach Applikation des Systems wurde in unmittelbarer Nähe der MRE 3 eine Probe aus dem Kombinationssystem entnommen und die Entnahmestelle nicht wider verschlossen, was den darauf folgenden Widerstandsabfall an MRE 3 in den obersten zwei Messtiefen erklärt.

#### 4.5.7.2 Wirksamkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes

##### 4.5.7.2.1 Schutzstrom

Die Ergebnisse der Strommessung sind in Bild 4.5-12 über die Versuchszeit dargestellt. Innerhalb der ersten vier Wochen wurde der Schutzstrom zunächst über einen Messwiderstand von 8 Ohm bestimmt. Die zwischen der Zinkbeschichtung und der Bewehrung gemessenen Wechselstromwiderstände lagen jedoch aufgrund der Größe der Fläche nur bei ca. 2 Ohm. Der Schutzstrom wurde demzufolge anfangs durch den hohen Messwiderstand erheblich reduziert. Zur Reduzierung dieses Einflusses wurde der Messwiderstand daraufhin auf 0,82 Ohm herabgesetzt.

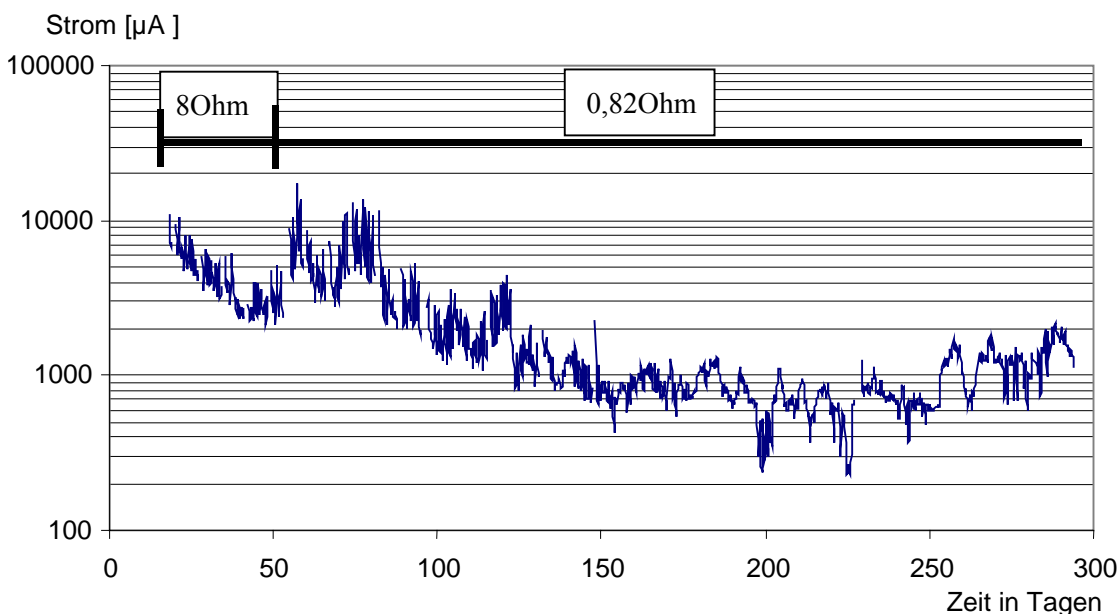


Bild 4.5-12: Strommessung zwischen Zinkanode und gesamter Bewehrung

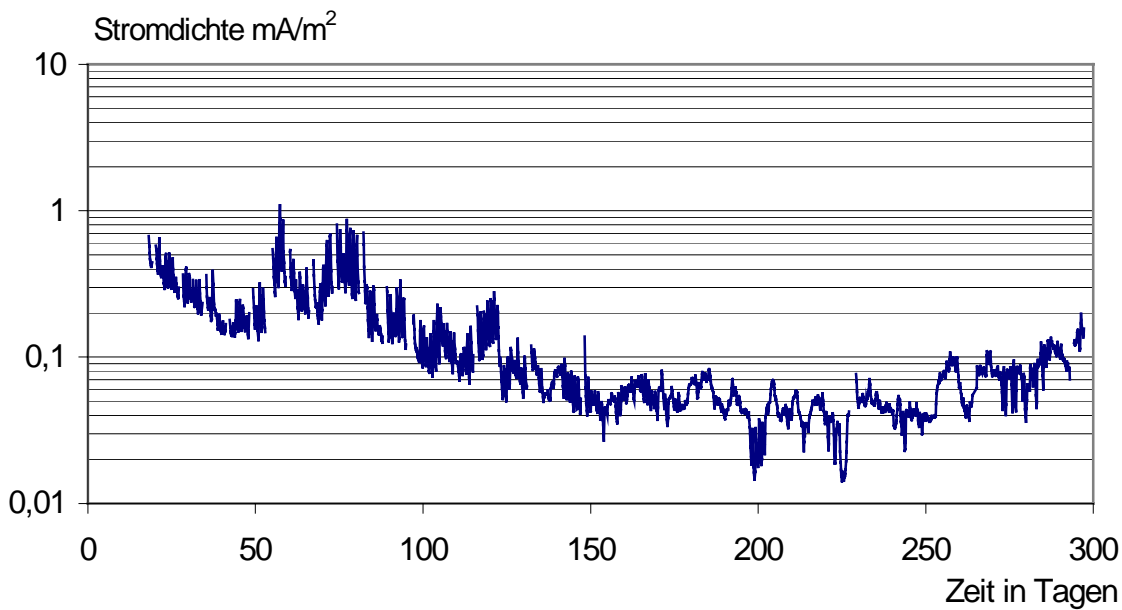


Bild 4.5-13: Schutzstromdichten bezogen auf die Oberfläche der oberen Bewehrungslage (ca. 16 m<sup>2</sup>)

Der Einfluss des Messwiderstandes auf die Schutzstromhöhe lässt sich mit Hilfe von Gleichung (1) abschätzen:

$$I_S = I_e \cdot \left( 1 + \frac{R_M}{R_I} \right) \quad (1)$$

mit

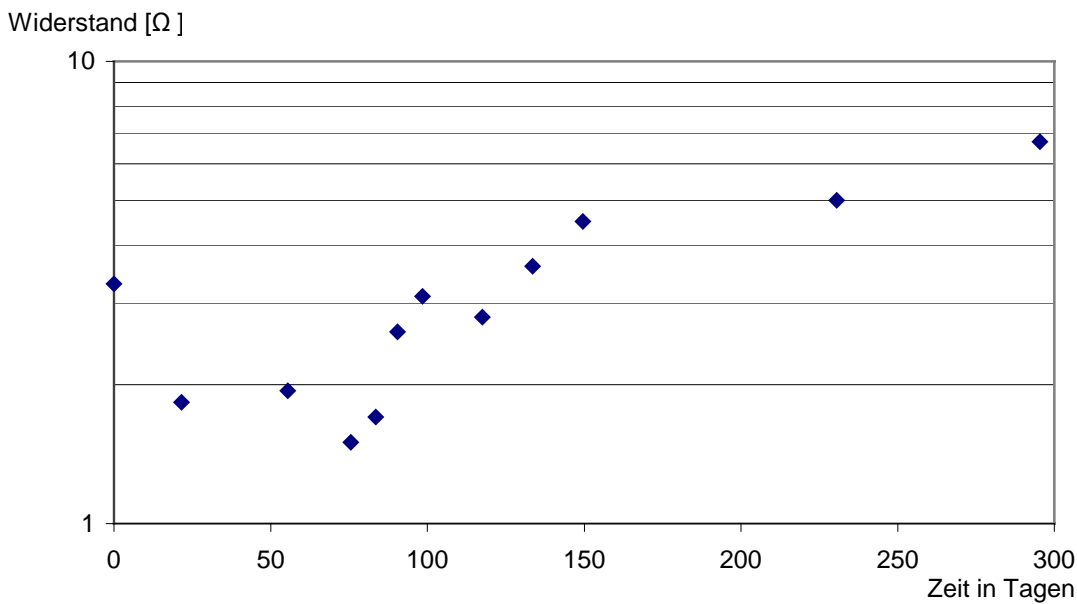
$I_e$  = gemessener Elementstrom

$I_S$  = Elementstrom ohne Einfluss des Messwiderstands

$R_I$  = Innenwiderstand der Korrosionszelle

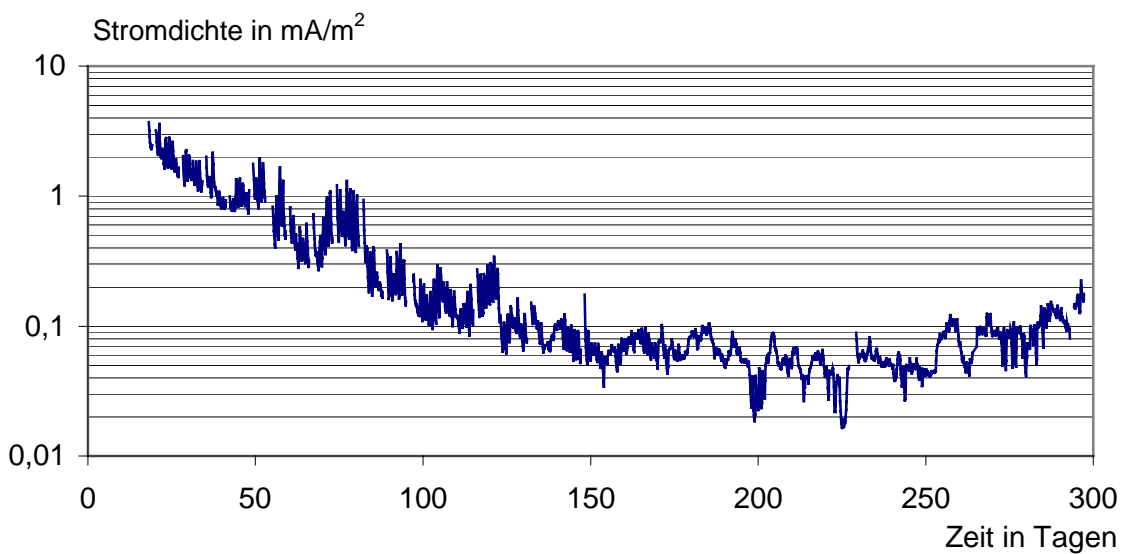
$R_M$  = Widerstand der Messbox (Shunt)

In Bild 4.5-14 ist die Entwicklung des Wechselstromwiderstandes bei 1000 Hz zwischen Zinkschicht und Bewehrung über die Versuchszeit dargestellt.



**Bild 4.5-14:** Entwicklung des Wechselstromwiderstandes bei 1000 Hz zwischen Zinkschicht und Bewehrung

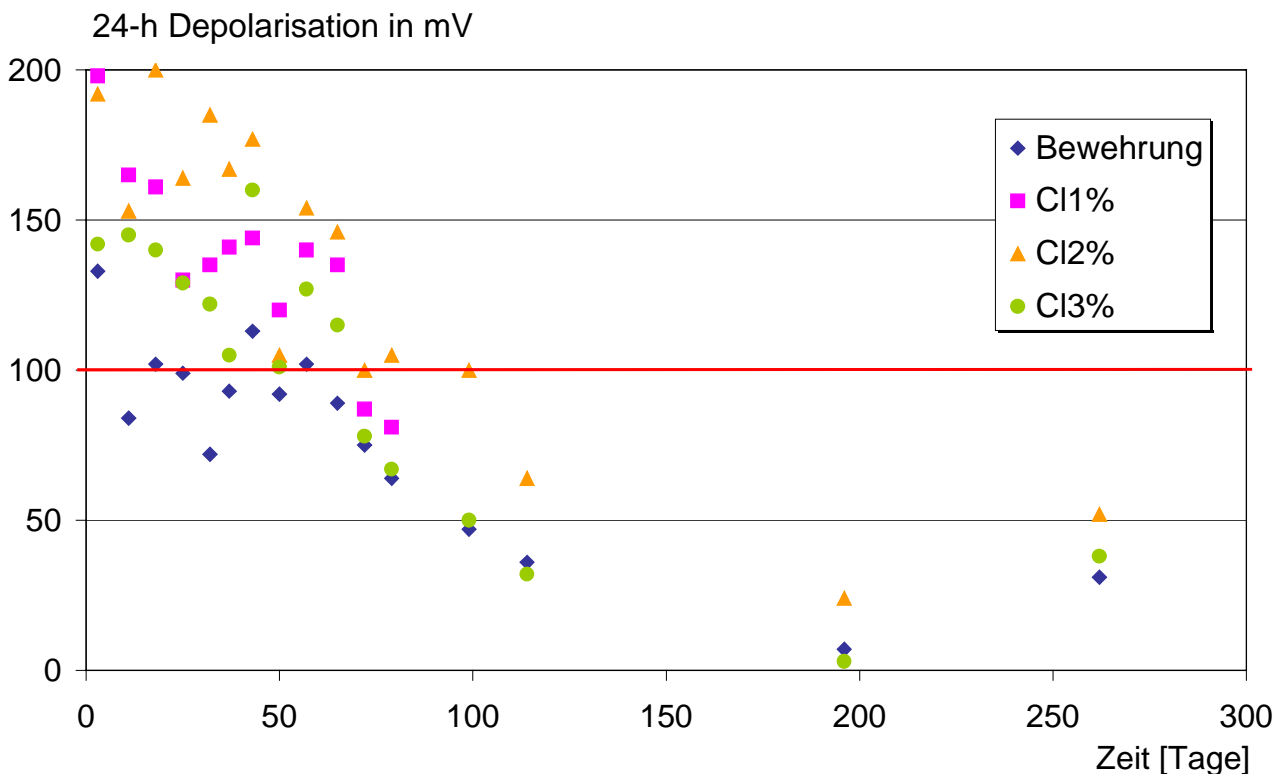
Unter der Annahme, dass der Anteil der anodischen und kathodischen Polarisationswiderstände am Innenwiderstand des Gesamtsystems vernachlässigbar ist, würde sich bei direktem Kurzschluss ohne Messwiderstand, der in Bild 4.5-15 dargestellte Verlauf der Schutzstromdichte ergeben.



**Bild 4.5-15:** Rechnerischer Verlauf der Schutzstromdichten nach Kompensation der Messwiderstände

#### 4.5.7.2.2 Ergebnisse der Potential- und Depolarisationsmessungen

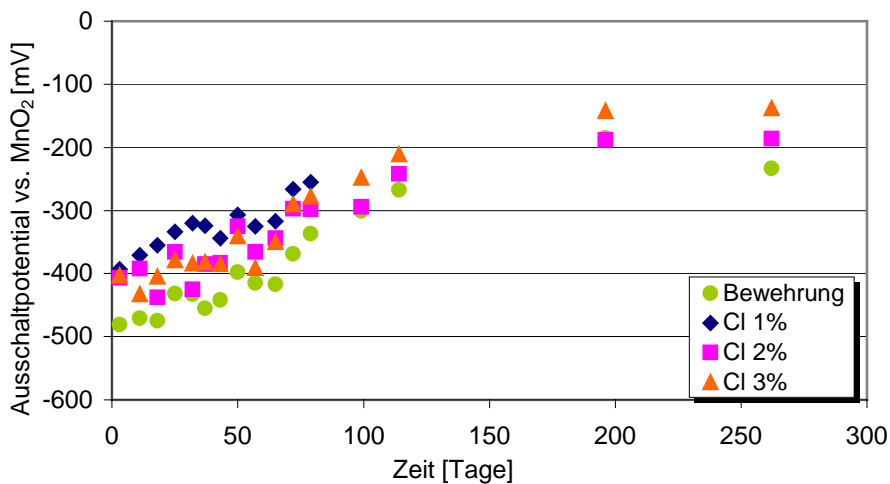
Die Ergebnisse der zur Beurteilung des kathodischen Schutzes nach DIN EN 12 696 /18/ durchgeführten Depolarisationsmessungen zeigt Bild 4.5-16. Um bei der Depolarisationsmessung praxisgerecht zu bleiben, wurde der elektrische Kontakt zwischen den zusätzlich eingebetteten Stäben und der übrigen Bewehrung während dieser Messungen nicht getrennt. Gemäß DIN EN 12 696 liegt ein ausreichender kathodischer Schutz vor, wenn das Bewehrungspotential innerhalb von 24 Stunden nach Trennung der Verbindung zur Anode um mehr als 100 mV ansteigt.



**Bild 4.5-16:** Ergebnisse der Depolarisationsmessungen (Zeitskala bezogen auf die erste Verbindung Zink-Bewehrung)

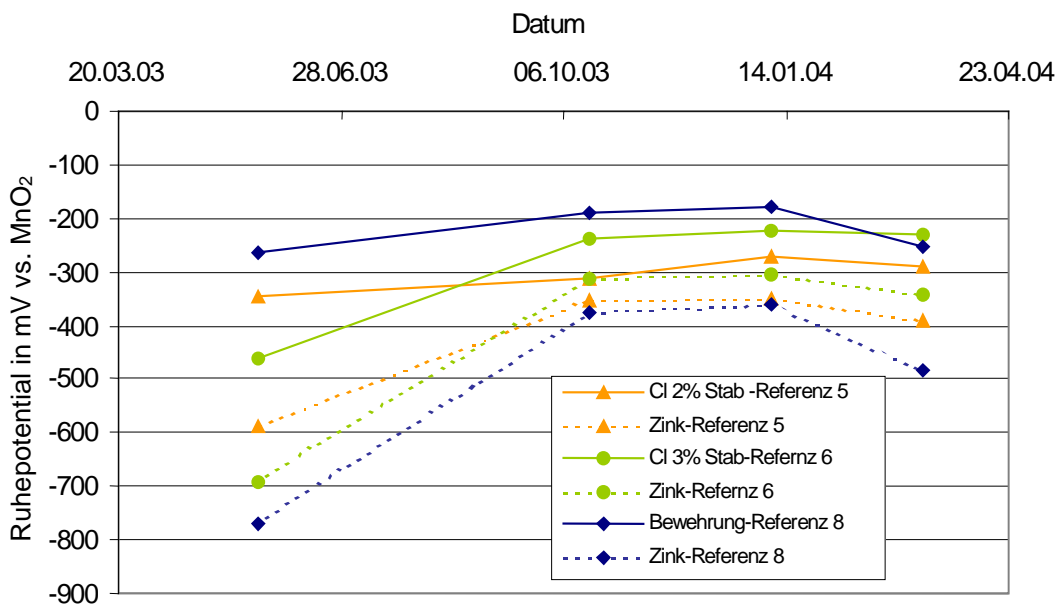
Wie aus Bild 4.5-17 deutlich wird, nehmen die Depolarisationswerte mit zunehmender Versuchsdauer deutlich ab, so dass das 100-mV-Kriterium größtenteils nur innerhalb der ersten zwei Monate des Versuchszeitraumes erreicht wurde. Danach sanken die Depolarisationswerte zunächst kontinuierlich auf unter 25 mV ab, bevor sie bei der bislang letzten Messung an allen Messstellen korrespondierend zu den gemessenen Schutzströmen wieder leicht anstiegen. Ursache für diesen Wideranstieg könnte der beginnende Frühling und der damit verbundene Anstieg der Temperaturen in der Betondeckung sein.

Die gemessenen Ausschaltpotentiale der Bewehrung und der zusätzlichen Stäbe über die Versuchszeit zeigt Bild 4.5-17. Auch hier ist eine gute Korrelation zum Schutzstromverlauf festzustellen.



**Bild 4.5-17:** Ausschaltpotentiale der Bewehrung über die Versuchszeit (Zeitskala bezogen auf die erste Verbindung Zink-Bewehrung)

Das der deutliche Abfall der Schutzströme und Depolarisationswerte über die Versuchszeit nicht allein auf den Anstieg des Elektrolytwiderstandes der Betondeckung zurückzuführen ist, zeigen die nach 48-stündiger Depolarisation gemessenen „Ruhepotentiale“ der Bewehrungselemente und der Zinkschicht (Bild 4.5-18).

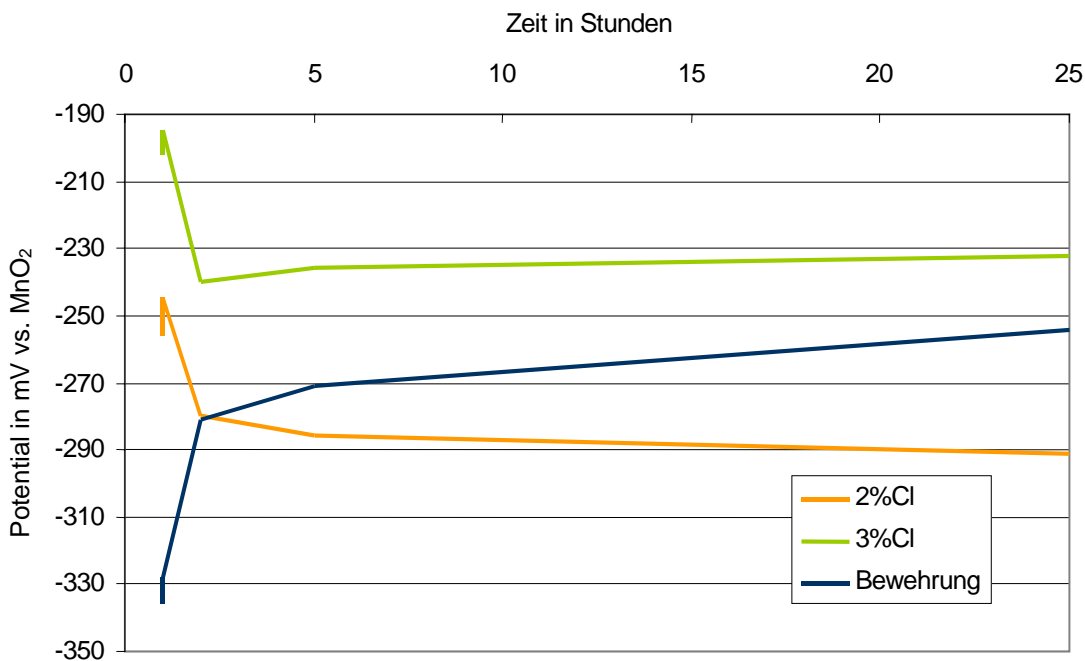


**Bild 4.5-18:** Ruhepotentiale der Bewehrung und der Zinkschicht nach 48-stündiger Depolarisation (gegen  $\text{MnO}_2$ )

Die Ruhepotentiale der Zinkschicht steigen über die Versuchszeit über  $-350$  mV an, so dass schon die Treibspannung des Systems vor allem bei den zusätzlich eingebetteten Stäben unter  $100$  mV liegt, wodurch ein Erreichen des  $100$ -mV-Kriteriums bei der Depolarisation unmöglich wird. Die Maßgebliche Ursache für den starken Anstieg des Zinkpotentials ist vermutlich die Austrocknung der Kontaktzone Zink-Beton. Dieser Zusammenhang zwischen dem Zinkpotential und der Feuchte in der Kontaktzone wurde beispielsweise ebenfalls in /11/ beschrieben.

Dass derzeit zumindest für die zusätzlich eingebetteten Bewehrungsstäbe in 2 bzw. 3 % chloridhaltigem Mörtel kein kathodischer Schutz mehr vorliegt, zeigen zudem Depolarisationsmessungen, die am 15.03.2004 durchgeführt wurden. Es wurde die Depolarisation an dem jeweiligen Element nach seiner Trennung nicht nur von der Zinkschicht, sondern auch von der übrigen Bewehrung nach 1 Stunde, nach 4 und nach 24 Stunden gemessen. Die ermittelten Potentialentwicklungen zeigt Bild 4.5-18.





**Bild 4.5-19:** Depolarisationsmessungen der Bewehrung und der zusätzlich eingebetteten Stäbe (elektrisch getrennt, gegen MnO<sub>2</sub>)

Es ist zu erkennen, dass sich die Potentiale der zusätzlich eingebetteten Stäbe nach der Trennung vom Gesamtsystem in negative Richtung verschieben. Dies bedeutet, dass diese zusätzlichen Stäbe auch während der Verbindung zur Zinkschicht im Gesamtsystem anodisch polarisiert werden, so dass ein wirksamer kathodischer Schutz nicht vorliegt.

#### 4.5.8 Zusammenfassung

Das neu entwickelte Kombinationsschutzsystem wurde auf einer Versuchsfläche eines Parkhauses in Aachen appliziert. Die Versuchsfläche wurde daraufhin über eine Zeit von ca. 10 Monaten hinsichtlich der Feuchteentwicklung der Betondeckung sowie der Wirksamkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes durch die Zinkschicht untersucht.

Tiefengestaffelte Messungen der Elektrolytwiderstände der Betondeckung zeigten, dass bereits eine deutliche Austrocknung der Betondeckung vor allem in den oberflächennahen Bereichen stattfindet. Zwar stiegen die Elektrolytwiderstände bereits auch in Höhe der obersten Bewehrungslage merklich an, jedoch ist zu bezweifeln, dass dieser Anstieg bereits eine Verringerung der Korrosionsraten auf vernachlässigbare Werte mit sich bringt.

Die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes durch die Zinkschicht hat mit der Zeit stark abgenommen. Nur innerhalb der ersten 2 Monate konnte anhand des 100-mV-Kriteriums nach DIN EN 12 696 eine ausreichende Wirksamkeit gezeigt werden. Ursache für den frühen Verlust des Kathodischen Schutzes ist vermutlich eine zu starke Austrocknung der Kontaktzone Zink-Beton, die zu einem Anstieg des Ruhepotentials der Zinkschicht auf Werte positiver  $-350$  mV ( $\text{MnO}_2$ ) führte.

## **5 GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE MIT DEN ZIELSETZUNGEN DES URSPRÜNGLICHEN FORSCHUNGSANTRAGS**

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines kombinierten Schutzsystems für die Instandsetzung korrosionsgeschädigter Stahlbetonbauteile, bei dem das Prinzip des Trockenlegens mit einem temporären kathodischen Korrosionsschutz für die Übergangszeit des Austrocknens des Beton ergänzt wird. Hierzu waren verschiedene Fragestellungen zu klären:

- Ist der Verbund zwischen Spritzverzinkung und Beton sowie zum Oberflächen-schutzsystem ausreichend und dauerhaft?

Die Ergebnisse hinsichtlich dieser Fragestellung zeigen, dass nach künstlicher Beanspruchung grundsätzlich bei Verwendung des hier untersuchten OS-11a-Systems ein ausreichender Verbund erreicht werden kann. Die Schwachstelle im System stellt dabei die Kontaktfläche Zink-Beton dar. Infolge des kathodischen Schutzes nehmen die Haftzugfestigkeiten jedoch ab. Probleme mit der Haftung ergaben sich jedoch infolge einer Blasenbildung zwischen Zinkschicht und OS-System bei sehr hohen Chloridgehalten des Betons im Betrieb als Opferanodensystem sowie an der mit Fremdstrom beaufschlagten Zinksschicht 9 Jahre alter Versuchsplatten infolge der Korrosionsprodukte in der Kontaktzone Zink-Beton. Beim Praxisversuch auf dem Aachener Parkhaus traten nach mehrmonatiger Befahrung durch Pkws noch keine Haftungsprobleme auf.

- Reicht ein galvanischer Schutz zwischen Zink als Opferanode und der Bewehrung aus, oder muss Fremdstrom eingesetzt werden, um die Zinkschicht nach einer gewissen Zeit bzw. regelmäßig zu aktivieren?

Ein wirksamer kathodischer Schutz über eine ausreichend lange Zeit scheint bei Verwendung des Zinks als Opferanode nur bei hohen Chloridgehalten möglich zu sein. Bei geringeren Chloridgehalten wird die Zinkschicht innerhalb einiger Monate inaktiv. Die Versuche an 9 Jahre alten Probekörpern mit Zinkschicht zeigen, dass ein kathodischer Schutz durch Fremdstrombeaufschlagung mit regelmäßiger Reaktivierung der Schicht durch kurzzeitige Umpolung möglich ist.

- Welche Zinkschichtdicken sind erforderlich, um für den Übergangszeitraum bis zur ausreichenden Trockenlegung einen Schutz der Bewehrung zu erreichen?

Bei den maximal gemessenen mittleren Stromdichten im Opferanodenbetrieb von ca.  $7,5 \text{ mA/m}^2$  wäre eine Zinkschicht von  $250 \mu\text{m}$  erst nach 10 bis 11 Jahren vollständig verbraucht, so dass der Zeitraum bis zur Austrocknung der Betons aus dieser Sicht sicher überbrückt werden könnte.

- Bis zu welchen Chloridgehalten im Beton ist das kombinierte Schutzverfahren anwendbar?

Die Ergebnisse zeigen, dass ein wirksamer kathodischer Schutz im Betrieb der Zinkschicht als Opferanode nur bei hohen Chloridgehalten oberhalb von 2,5 M.-% bezogen auf den Zement erreicht werden kann. Bei niedrigeren Chloridgehalten ist eine Beaufschlagung mit Fremdstrom erforderlich, um einen ausreichenden kathodischer Schutz zu erreichen. Es ist jedoch fraglich, ob bei Chloridgehalten oberhalb von 2,5 M.-%, infolge der Hygroskopizität der Chloride eine ausreichend schnelle Austrocknung des Betons zur Reduzierung der Korrosionsraten der Bewehrung erfolgen kann.

Es wurde ein kombiniertes Schutzsystem entwickelt, dessen praktischer Einsatz allerdings deutlichen Einschränkungen unterworfen ist.

## **6 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER FORTSCHRITT UND NUTZEN FÜR KLEINE UND MITTLERE UNTERNEHMEN**

Durch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wurde der wissenschaftliche Kenntnisstand hinsichtlich der Anwendbarkeit von Spritzverzinkungen zur Instandsetzung korrosionsgeschädigter Stahlbetonbauteile erheblich erweitert. Die erzielten Ergebnisse bieten eine fundierte Planungsgrundlage für planende und ausführende Unternehmen im Bereich der Instandsetzung von Stahlbeton. Das neu entwickelte Kombinationssystem könnte bei Betrieb als Fremdstromsystem zukünftig Instandsetzungen ermöglichen, die bisher aus Kostengründen bzw. statischen Gründen praktisch nicht durchführbar waren und somit für kleine und mittelständische sowie für spezialisierte Fachplanungsbüros neue Tätigkeitsfelder erschließen.

Weiterhin helfen die aufgezeigten Grenzen der Wirkung der Spritzverzinkung als Opferanode, vor allem bei gleichzeitiger Verwendung einer Oberflächenbeschichtung, zukünftig Fehler bei der Anwendung der Spritzverzinkung und daraus entstehende Kosten zu vermeiden.

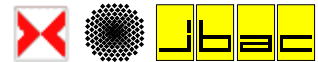
## **7 DANKSAGUNG**

Das Vorhaben wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter der Vorhaben-Nummer 12818 N gefördert. Die Autoren bedanken sich bei der AiF und dem BMWA für die Förderung.

Weiterhin bedanken sich die Autoren bei der Grillo-Werke AG und der PeinigerRöRo GmbH für die Erstellung der Zinkschichten, bei der RWTH Aachen für die Bereitstellung der Versuchsfläche am Parkhaus Eilfschornsteinstraße sowie bei der tedema GmbH und der MC Bauchemie Müller GmbH für die kostenlose Bereitstellung von Material.

## **8 SCHUTZRECHTE**

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte aus dem Projekt erworben.



## 9 VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

Bruns, M. ; Raupach, M.

Innovative Systeme für den kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen. Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2004. In: Verkehrsbauten : Schwerpunkt Parkhäuser, 1. Kolloquium, Ostfildern, 27. und 28. Januar 2004, (Gieler-Breßmer, S. (Ed.)), S. 345-352

A. Burkert, G. Eich and R. Bäbler

Integrated Protection System for Chloride Deteriorated Concrete Structures Nace Corrosion 2004, March 28 - April 1, 2004, New Orleans, USA (Paper04720), p. 04720/1 - 11

A. Burkert, G. Eich and R. Bäbler

Use of Multiring-Electrodes for Humidity Measurements in Reinforced Concrete Blocks Tagungsband: Nace Corrosion 2004, March 28 - April 1, 2004, New Orleans, USA (Paper 04426), p. 04426/1 - 11

A. Burkert, G. Eich und J. Mietz

Entwicklung eines kombinierten Schutzsystems für chloridbelastete Betonflächen aus Spritzverzinkung mit abdichtender Beschichtung Tagungsband: 2. Kolloquium Gemeinsame Forschung im Korrosionsschutz, Neue Entwicklungen bei Fügeverfahren und Oberflächenschutz, 2.-3. März 2004, Frankfurt am Main, S. 72-83 ISBN 3-935406-12-6

Wolff, L. ; Raupach, M.:

Spritzverzinkung für die Instandsetzung chloridbelasteter Betonflächen. Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2003. - In: Industrieböden '03, Internationales Kolloquium, 21. - 23. Januar 2003, (Seidler, P. (Ed.)), Vol. II, S. 529-534



## **10 DURCHFÜHRENDE FORSCHUNGSSTELLEN**

### **10.1 Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung**

Fachgruppe V11.4 „Korrosion und Korrosionsschutz“

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. M. Maultzsch

Projektleiter: Dr.-Ing. J. Mietz

### **10.2 Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, ibac**

Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. M. Raupach

Projektleiter: Dipl.-Ing. L. Wolff

### **10.3 Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart**

Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (MPA)

Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. U. Nürnberger



## 11 LITERATUR

- /1/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton ; DAfStb-Instandsetzungs-Richtlinie: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze. Teil 2: Bauprodukte und Anwendung. Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung. Teil 4: Prüfverfahren. Ausgabe Oktober 2001. Berlin : Deutscher Ausschuß für Stahlbeton
- /2/ Covino, B.S. ; Bullard, S.J. ; Cramer, S.D. ; Holcomp, G.R. ; et al: Interfacial Chemistry of Zinc Anodes for Reinforced Concrete Structures. Houston, Tx. : NACE International, 1997. - In: Corrosion '97, Paper No. 233
- /3/ Delpire, P. ; Grimaldi, G. ; Raharinaivo, A.: The Aging Behaviour of Zinc Spray Coating Applied for Cathodic Protection of Reinforced Concrete. Detroit : American Concrete Institute, ACI SP-145, 1994. - In: Durability of Concrete. Third International Conference, Nice, France, May 22-28, 1994, (Malhotra, V.M. (Ed.)), S. 871-882
- /4/ Lee, S.K. ; Sigonney, Y.M. ; Hartt, W.H. ; Lee, R.U.: Characterization of the Arc Sprayed Zinc Coating-Concrete Interface by Electrochemical Techniques. Houston, Texas : NACE International, 1999. - In: Corrosion 99, San Antonio, Tex., 25.-30.04.1999, Technical Papers, No. 552
- /5/ Tinnea, J.: Field Performance of Sprayed Zinc Anodes in Controlling Corrosion of Steel Reinforced Concrete. Houston, Texas : NACE International, 1998. - In: Corrosion 98, San Diego, Calif., 22.-27.03.1998, Technical Papers, No. 510
- /6/ Bennett, J.: Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Surface-Applied Zinc Anodes. Washington : Federal Highway Administration, FHWA, 1998. - Proceedings of the International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando, Florida, Dec. 7-11, 1998, 14 Seiten
- /7/ Apostolos, J.A. ; Parks, D.M. ; Carello, R.A.: Cathodic Protection Using Metallized Zinc a 3,5 Year Progress Report. Houston : National Association of Corrosion Engineers, 1987. - In: Corrosion on Metals in Concrete ; Proceedings of the Corrosion/87 Symposium on Corrosion of Metals in Concrete, S. 168-181
- /8/ Covino, B.S. ; Bullard, S.J. ; Holcomb, G.R. ; Cramer, S.D. ; et al: Factors Affecting the Bonding of Arc-Sprayed Zinc to Concrete. In: Journal of Protective Coatings & Linings (1996), Nr. August, S. 23-37
- /9/ Electrochemical Aging of Humectant-Treated Thermal Sprayed Zinc Anodes for Cathodic Protection. Houston, Texas : NACE International 1997. - In: Corrosion '97, San Antonio, Texas, 25.-30.04.1999, Technical Paper Nr. 548

- /10/ Brousseau, R. ; Arnott, M. ; Dallaire, S. ; Nace ; Corrosion '93: The Adhesion of Metallized Zinc Coatings on Concrete: Part I. Houston : National Association of Corrosion Engineers. - In: Corrosion '93, Paper Nr. 331, 13 Seiten
- /11/ Sagües, A.A.; Powers, R.G.: Sprayed-Zinc Sacrificial Anodes for Reinforced Concrete in Marine Service. In: Corrosion 52 (1996), Nr. 7, S. 508-522
- /12/ Raupach, M.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Instandsetzungen bei Betonen mit hohem Chloridgehalt. Bonn : Bundesminister für Verkehr.- In Schriftenreihe Forschung Strassenbau und Straßenverkehrstechnik (1993), Nr. 658
- /13/ ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauwerke, Teil 7.1, Brückenbeläge, Ausgabe 01.03. Dortmund : Verkehrsblatt, 2003
- /14/ Beratungsstelle für Gußasphaltenwendung e.V.: Asphalt Kalender 2001. Berlin : Ernst & Sohn, 2001
- /15/ Bundesminister für Verkehr ; ZTV-BEL-B Teil 1 ; FGSV 783/2/3: Technische Lieferbedingungen für die Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn zur Herstellung von Brückenbelägen auf Beton nach den ZTV-BEL-B Teil 1. Technische Prüfvorschriften für Brückenbeläge auf Beton mit Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn nach den ZTV-BEL-B Teil 1. Köln : Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, 1999
- /16/ Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Wiesbaden : Bauverlag, 1995
- /17/ Isecke, B.: Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl in Betonbauten, 4. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 1999. – In: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, (Baekmann, W.v. und. Schwenk, W., (Ed.))
- /18/ DIN EN 12 696 06.00. Kathodischer Schutz von Stahl in Beton
- /19/ Daily, S.F. ; Green, W.K.: Galvanic Cathodic Protection of Reinforced and Prestressed Concrete Structures using CORRSPRAY<sup>TM</sup> – a Thermally Sprayed Aluminium Alloy, CP 51. Adresse: [www.corrpro.com](http://www.corrpro.com)
- /20/ P. Pedferri: Cathodic Protection and Cathodic Prevention. In: Construction and Building Materials 10 (1996) S. 391-402
- /21/ Zecho, M. ; Menzel, K. ; Nürnberger, U.: The Performance of Thermally Sprayed Zinc Coatings as Anode for Cathodic Protection on Reinforced Concrete. In: Otto Graf Journal Annual Journal on Research and Testing of Materials 9 (1998), S. 164-184

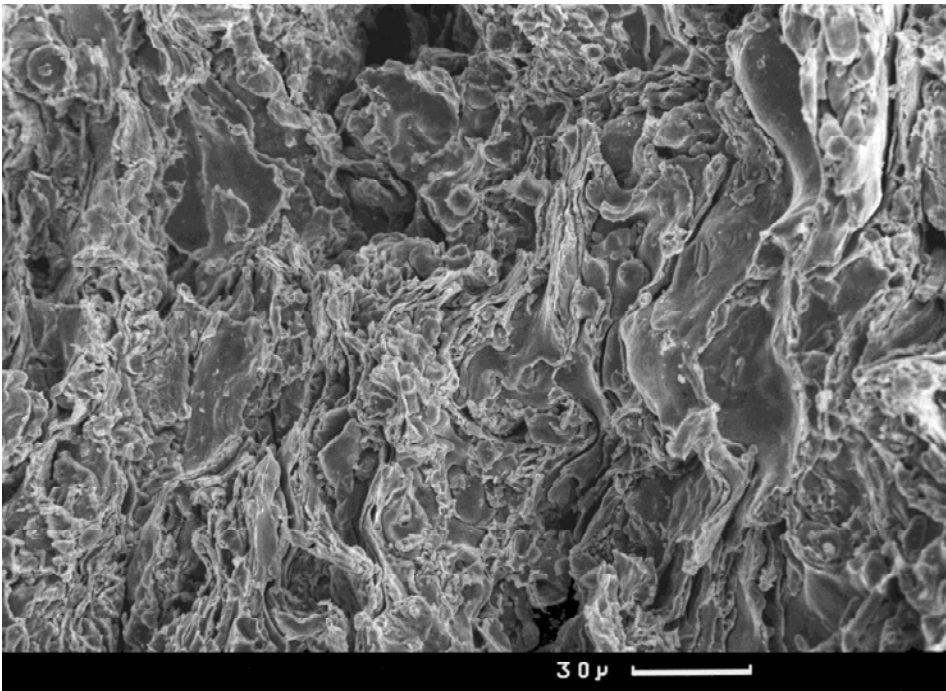


Bild B1: Neuwertige Zinkschicht (Bruchfläche Mitte Übersicht – REM-Aufnahme)

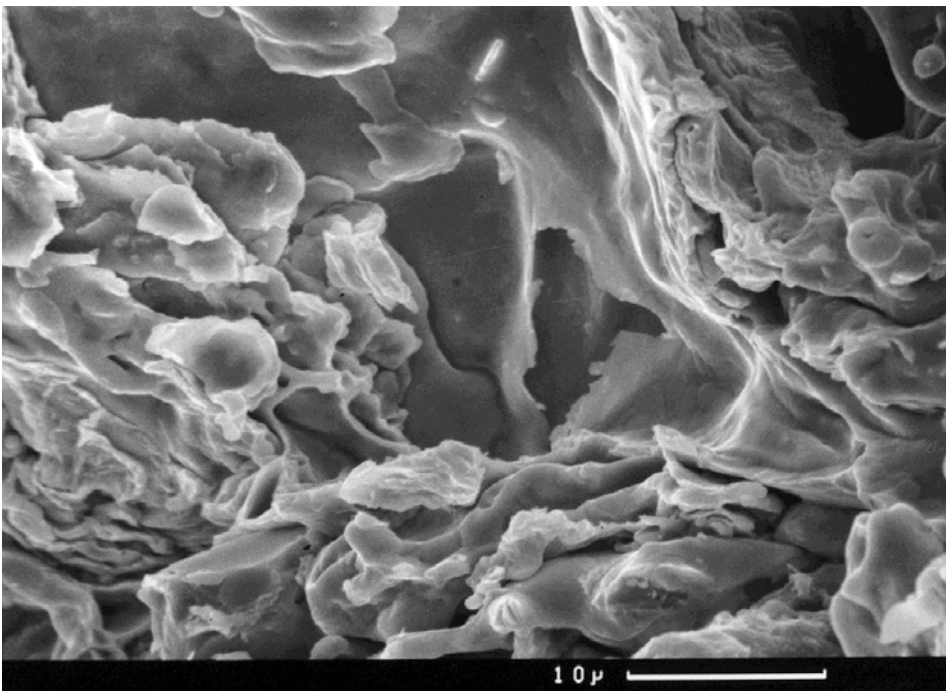


Bild B2: Neuwertige Zinkschicht (Bruchfläche Mitte – REM-Aufnahme)



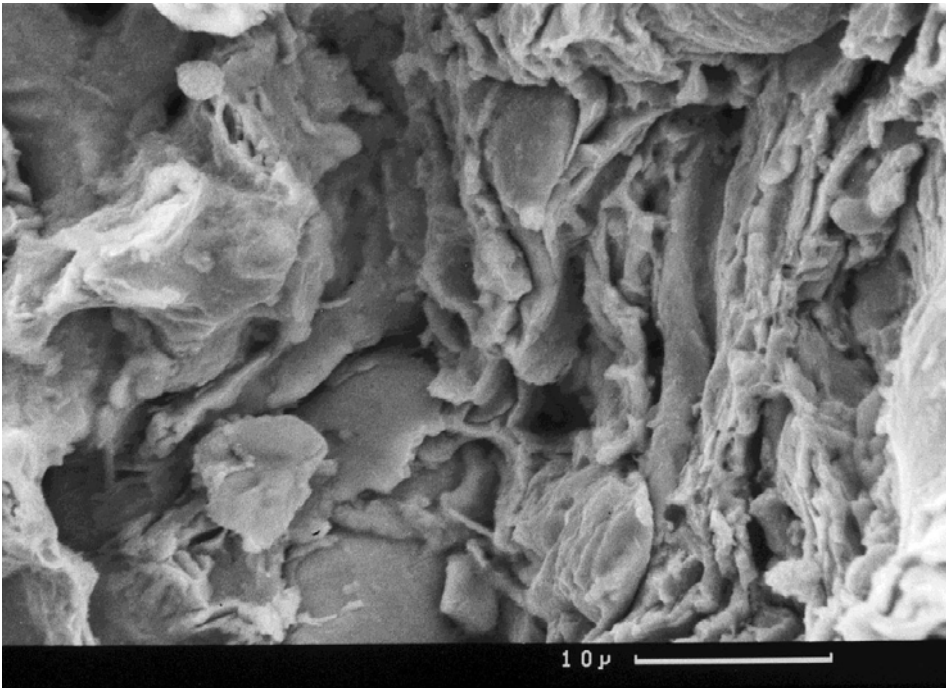


Bild B3: Bruchfläche einer 8 Jahre im Freien ausgelagerten Zinkschicht (ohne Kontakt mit Beton – REM-Aufnahme)

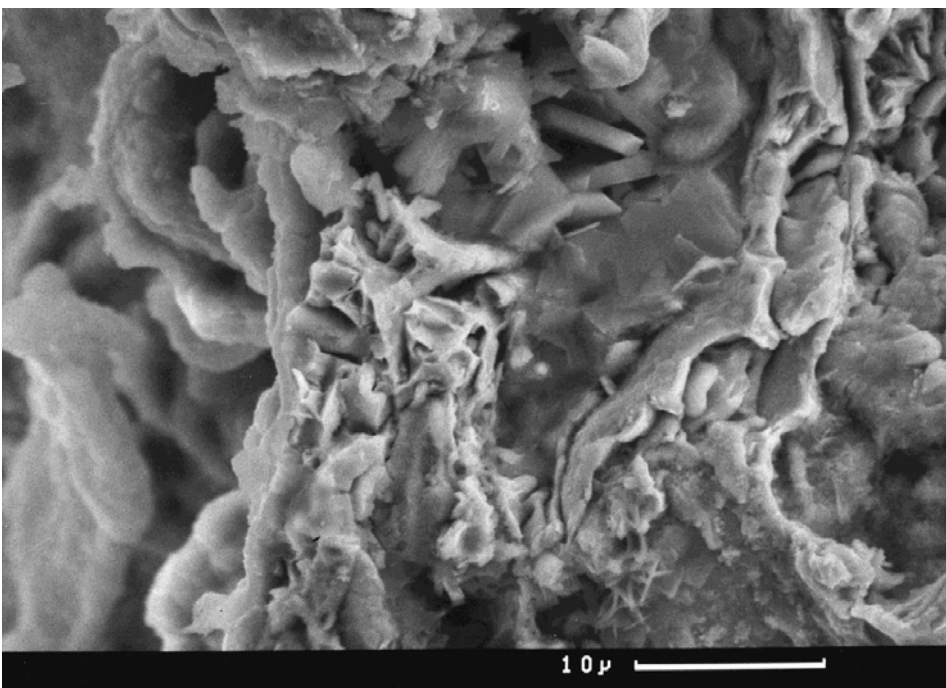


Bild B4: Bruchfläche einer 8 Jahre im Freien ausgelagerten Zinkschicht (ohne Kontakt mit Beton – REM-Aufnahme)

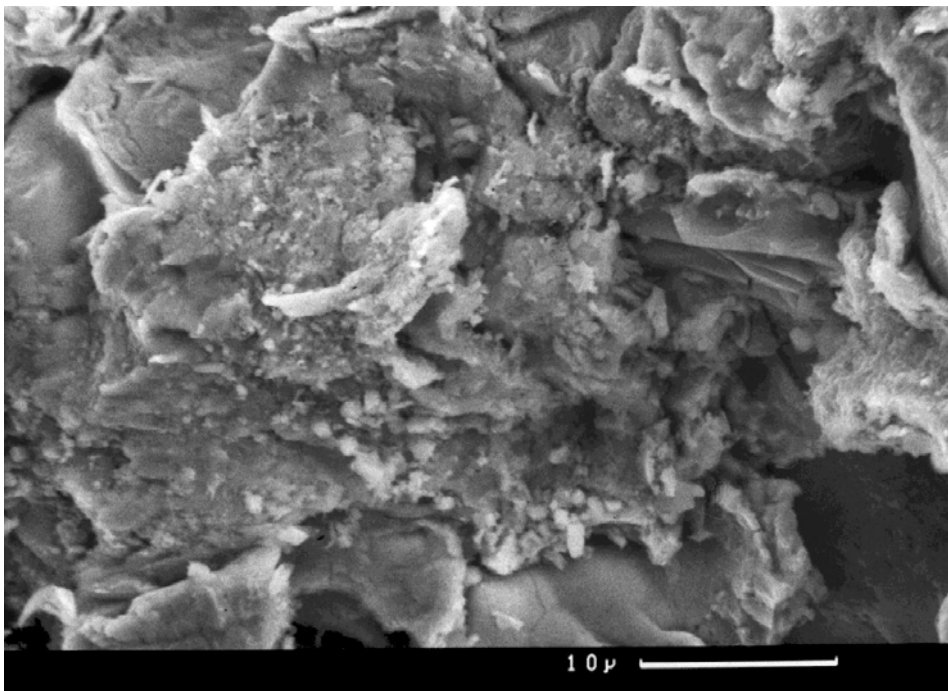


Bild B5: Bruchfläche einer 8 Jahre im Freien ausgelagerten Zinkschicht (ohne Kontakt mit Beton – REM-Aufnahme)

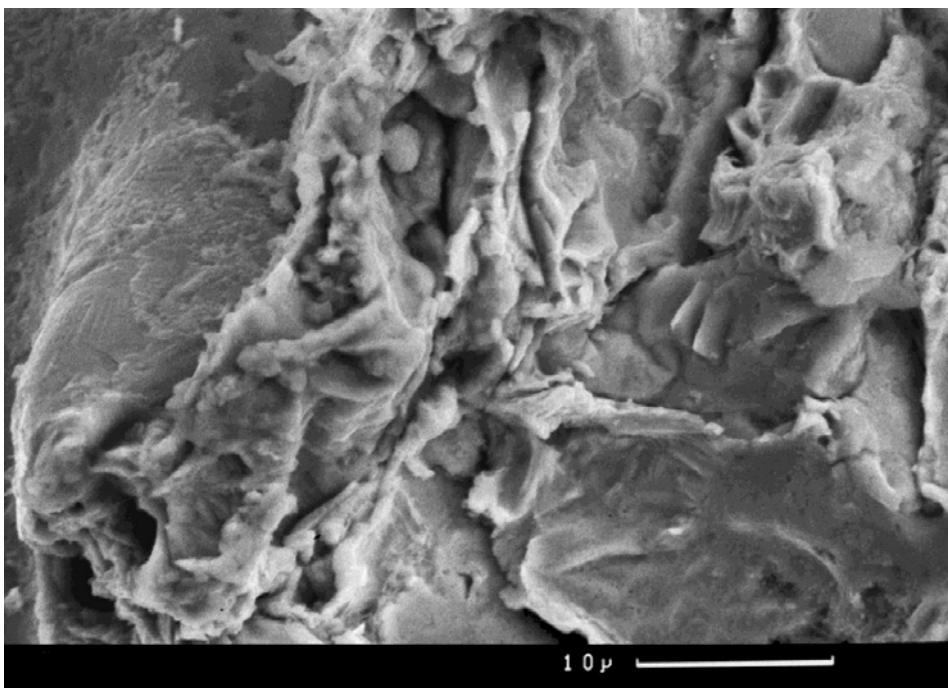


Bild B6: Bruchfläche einer 8 Jahre im Freien ausgelagerten Zinkschicht (Bruchfläche aus Schichtmitte – REM-Aufnahme)

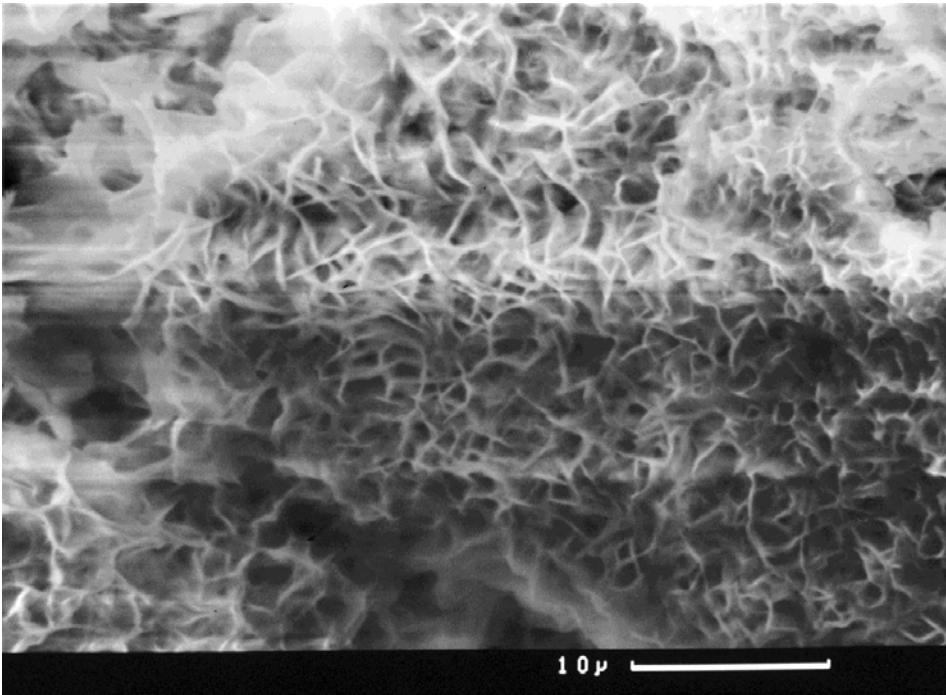


Bild B7: Bruchfläche einer 8 Jahre im Freien ausgelagerten Zinkschicht (Oberfläche mit Korrosionsprodukten – REM-Aufnahme)

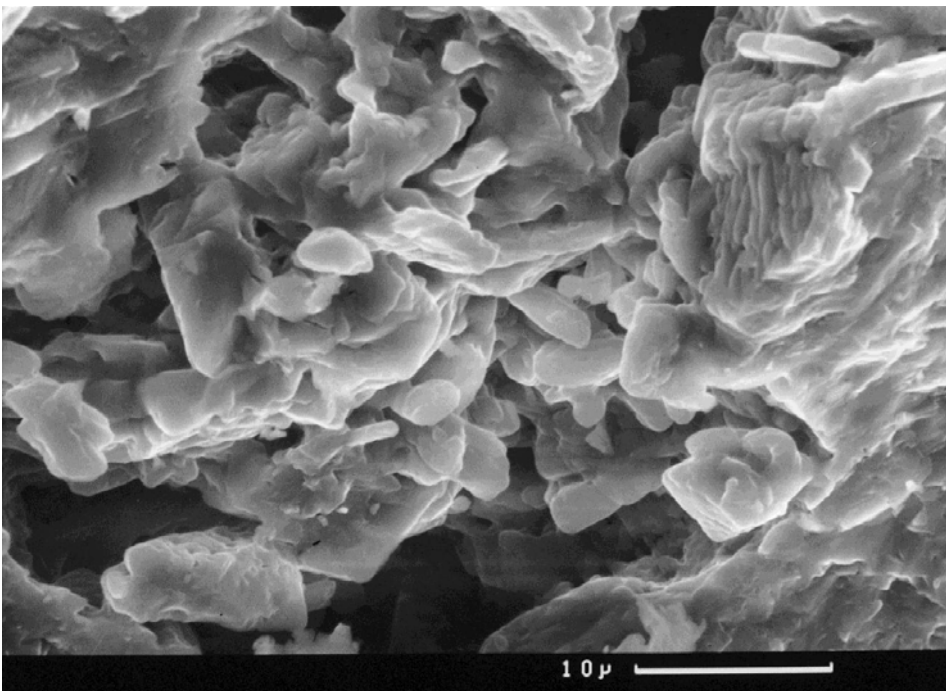


Bild B8: Probekörper 1: Korrosionsprodukte auf Zink (REM-Aufnahme)



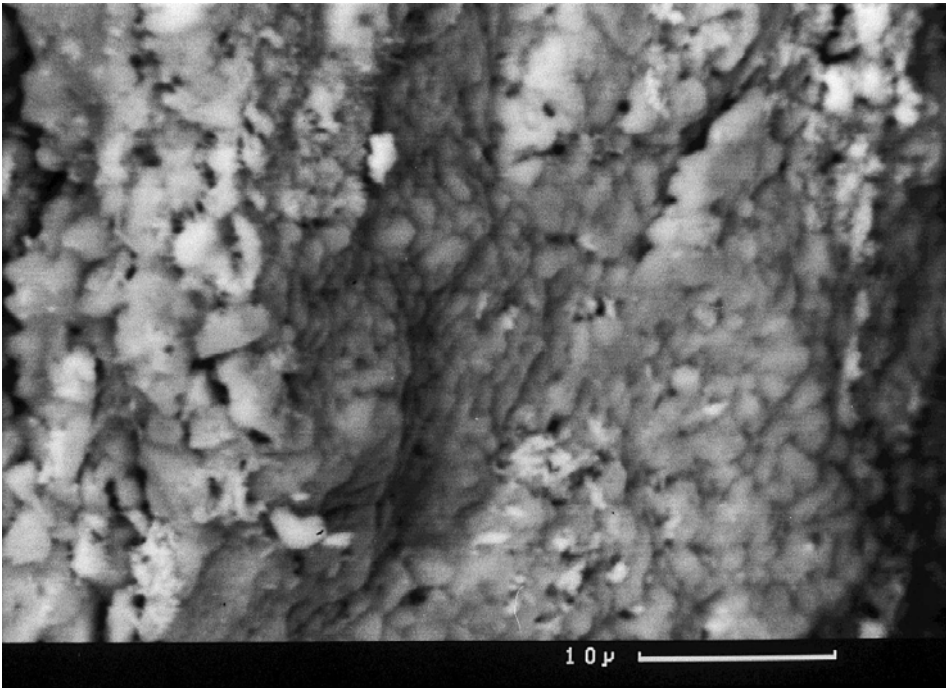


Bild B9: Probekörper 1: Zink/Beton (REM-Aufnahme)

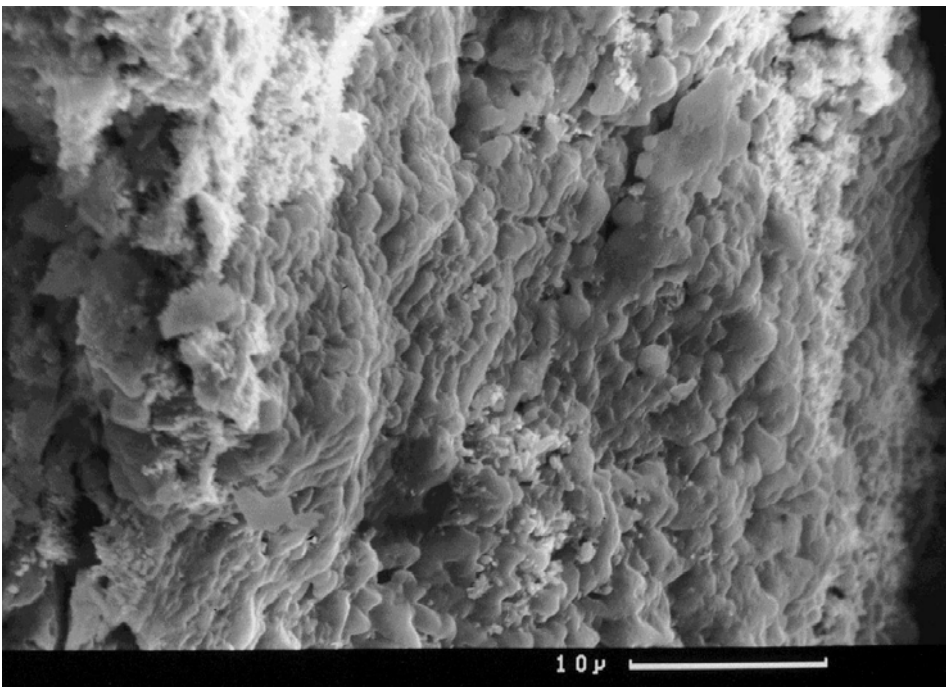


Bild B10: Probekörper 1: Zink/Beton (REM-Aufnahme)



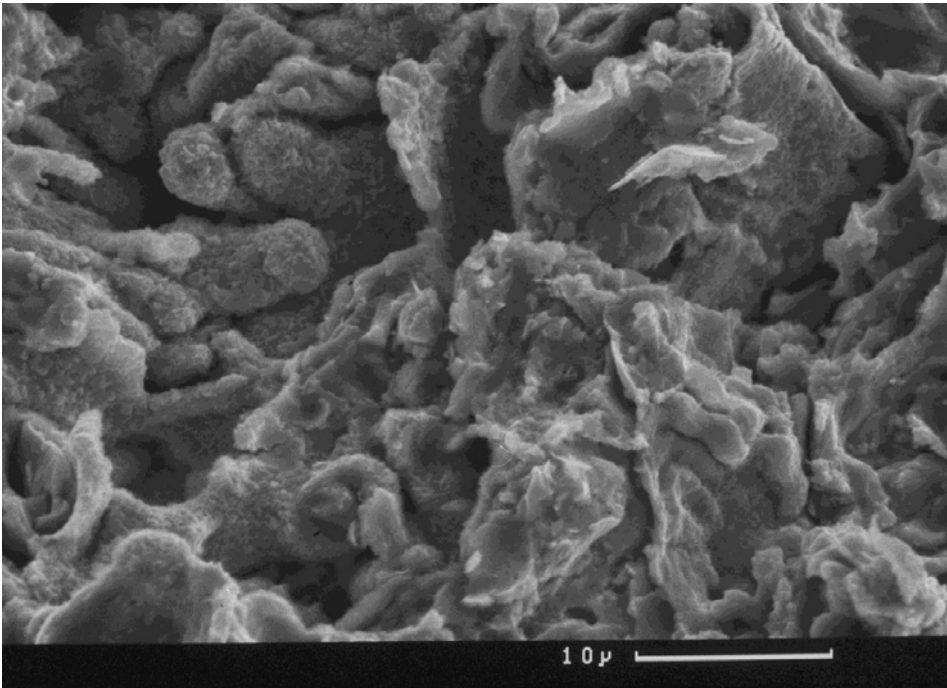


Bild B11: Probekörper 1: aufgebrochene Zinkschicht (Bruchfläche mit Korrosionsprodukten – REM-Aufnahme)

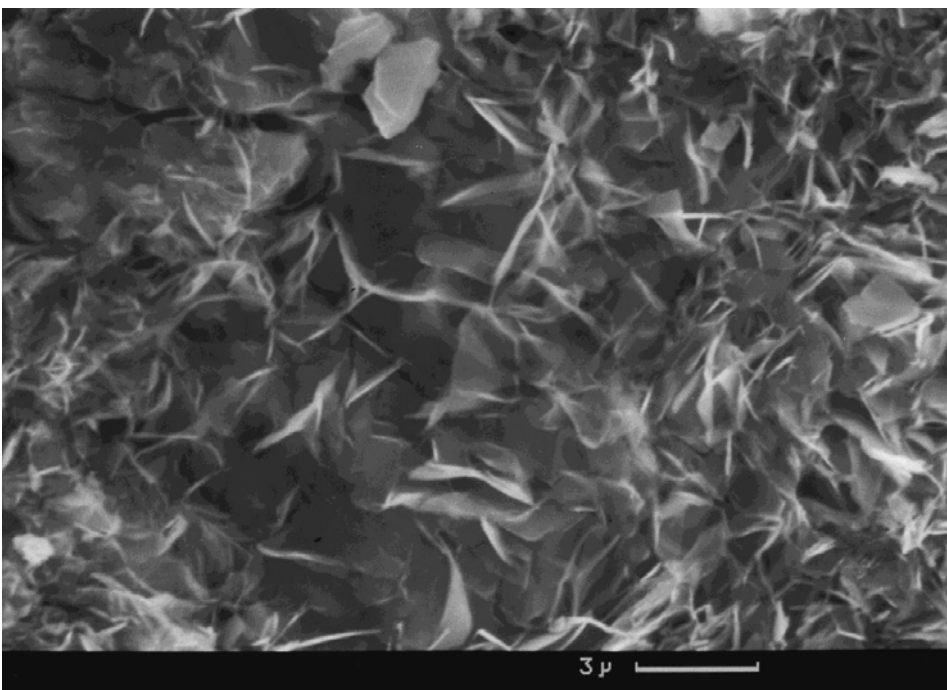


Bild B12: Probekörper 1: Korrosionsprodukte auf Zink (REM-Aufnahme)

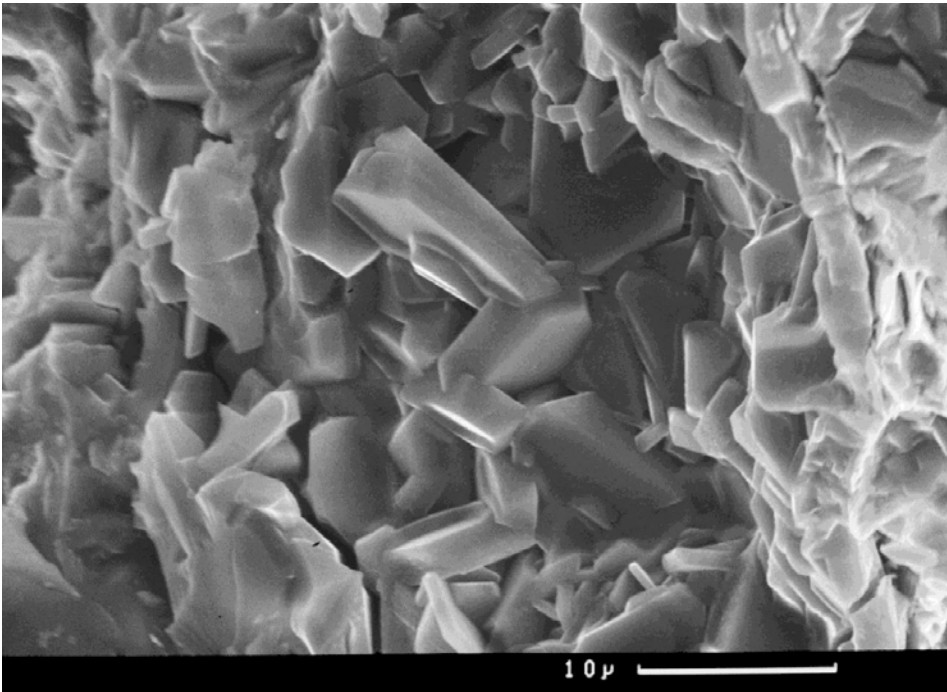


Bild B13: Probekörper 2: kristalline Korrosionsprodukte innerhalb der Zinkschicht (REM-Aufnahme)

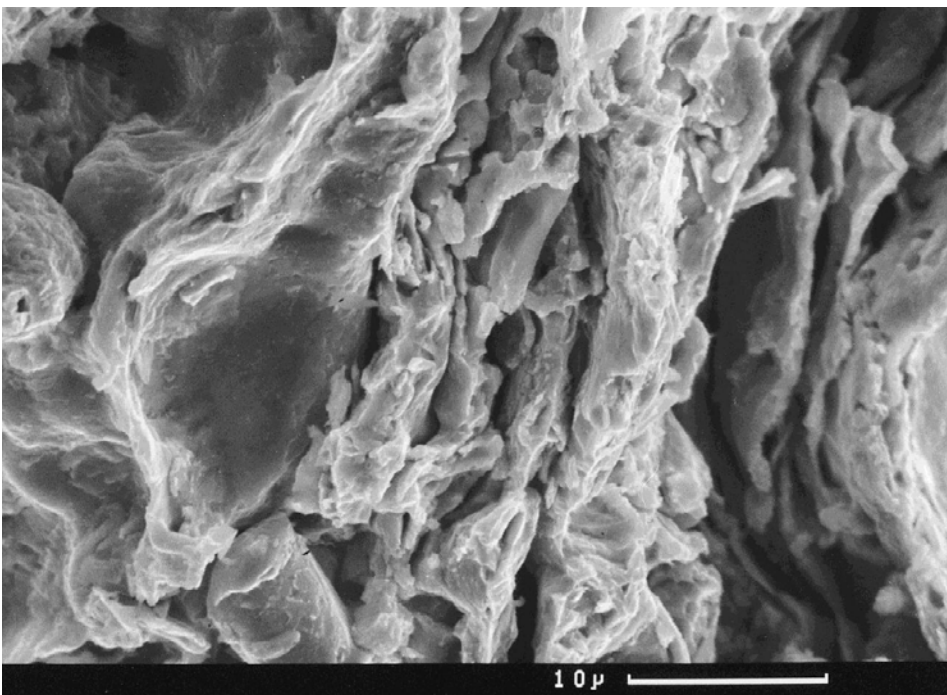


Bild B14: Probekörper 2: Bruchfläche Zinkschicht mit Korrosionsprodukten (REM-Aufnahme)

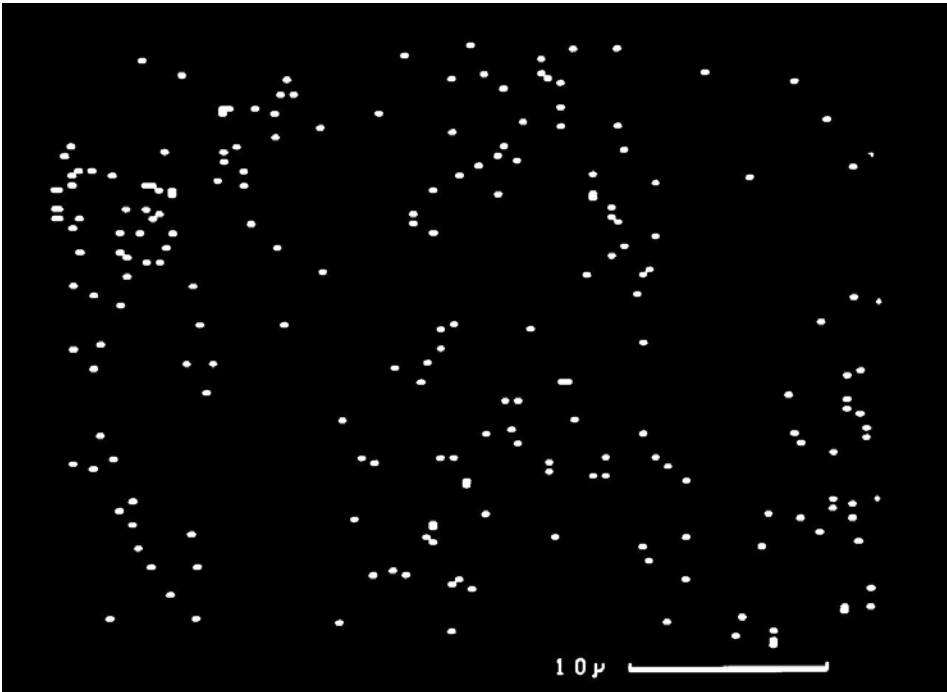


Bild B15: O-Verteilungsbild zu Bild B6

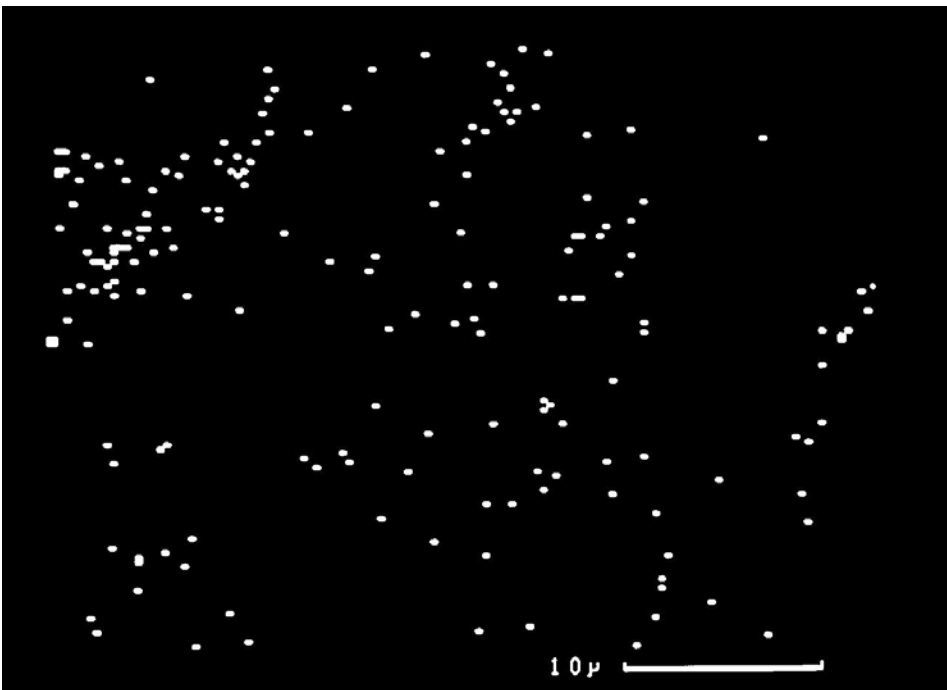


Bild B16: Cl-Verteilungsbild zu Bild B6

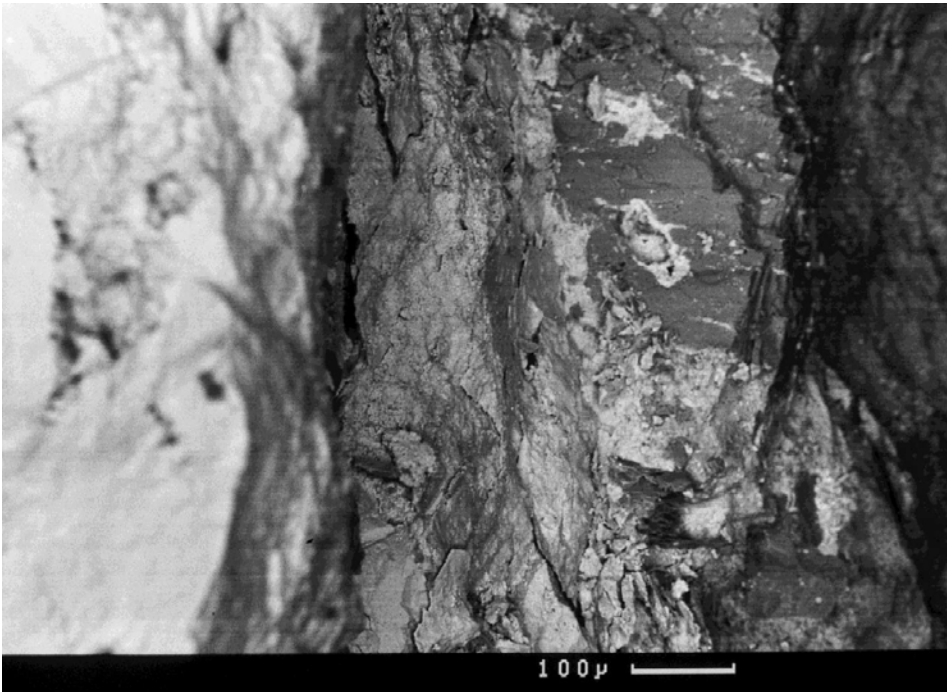


Bild B17: Probekörper 3: Zwischenschicht Zink/Beton (REM-Aufnahme)

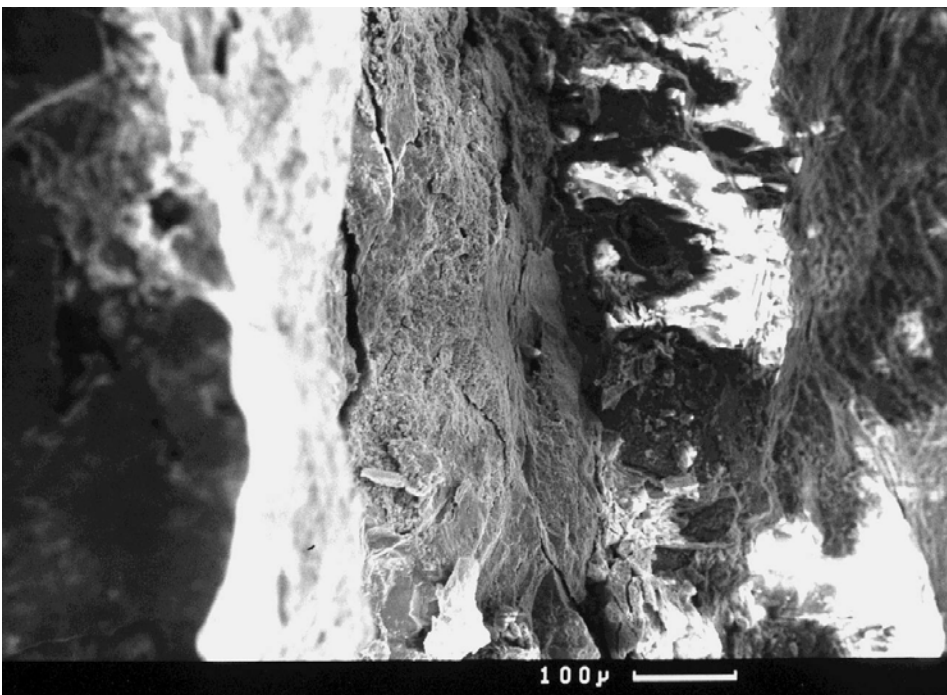


Bild B18: Probekörper 3: Zwischenschicht Zink/Beton (REM-Aufnahme)



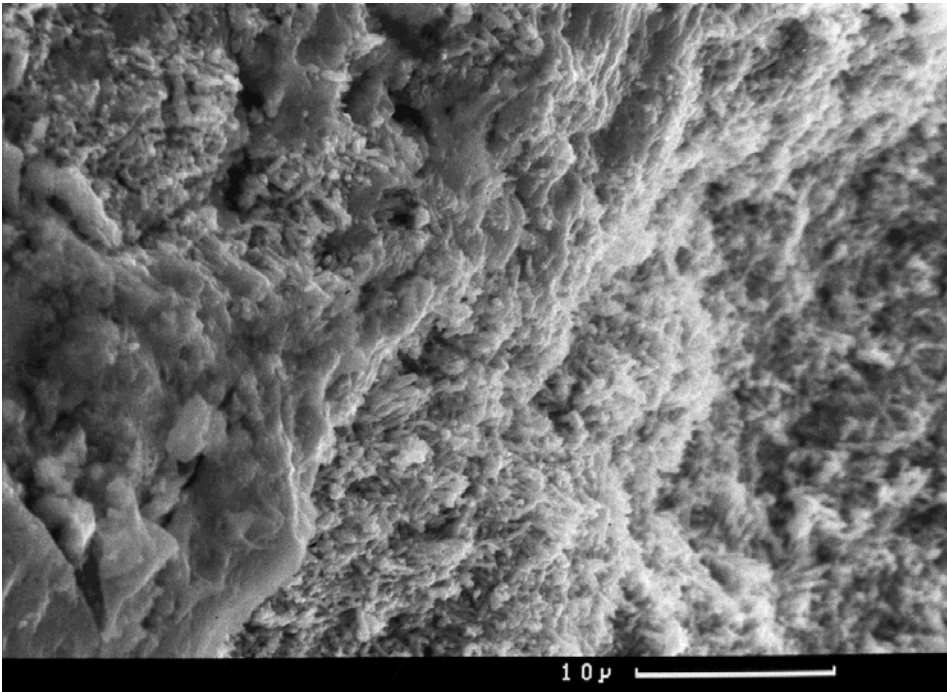


Bild B19: Probekörper 3: Korrosionsprodukte Zwischenschicht Zink/Beton (REM-Aufnahme)

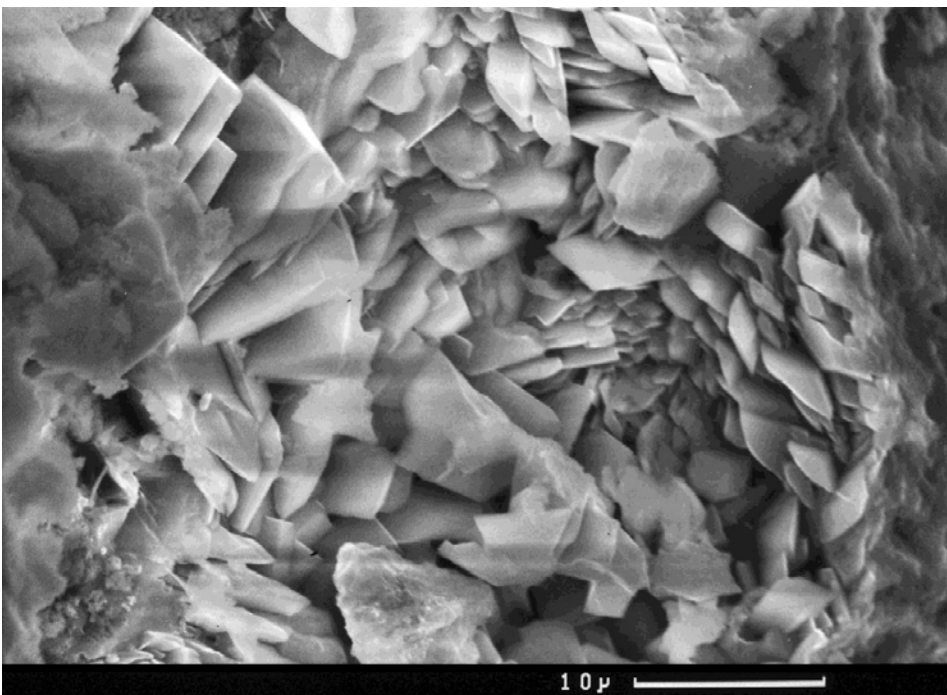


Bild B20: Probekörper 3: kristallines Calcium-Hydroxozinkat (?) an der Grenze Zink/Beton (REM-Aufnahme)

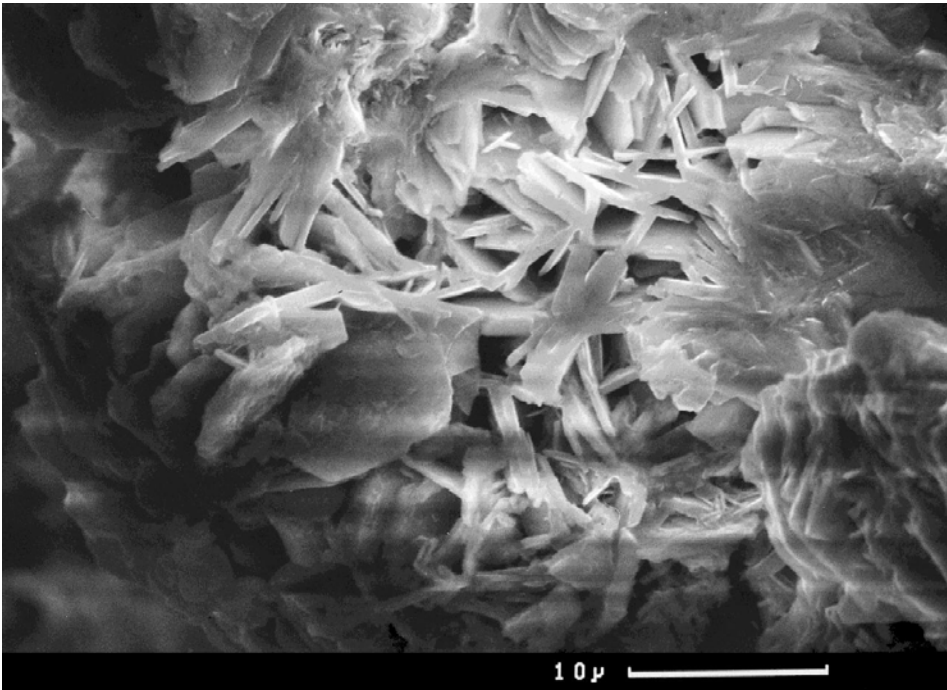


Bild B21: Probekörper 3: chloridhaltige kristalline Korrosionsprodukte innerhalb der Zinkschicht

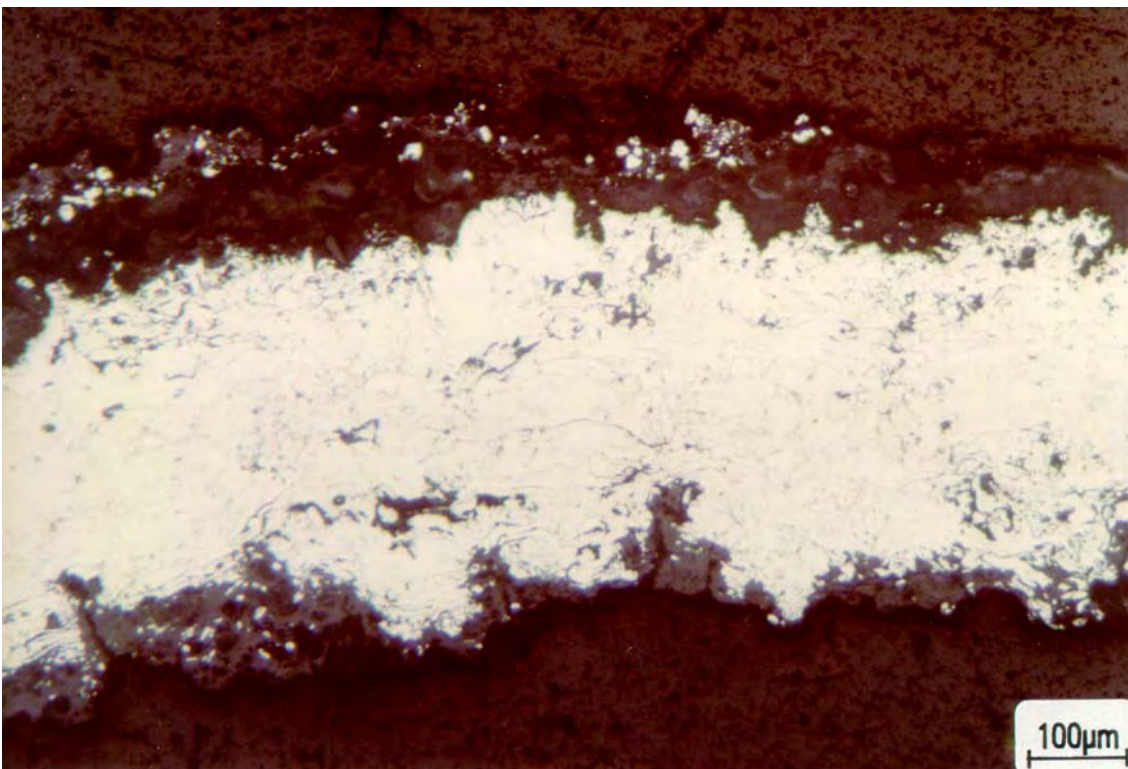


Bild B22: Querschliff durch eine Spritzschicht nach 8-jähriger Freiwitterung



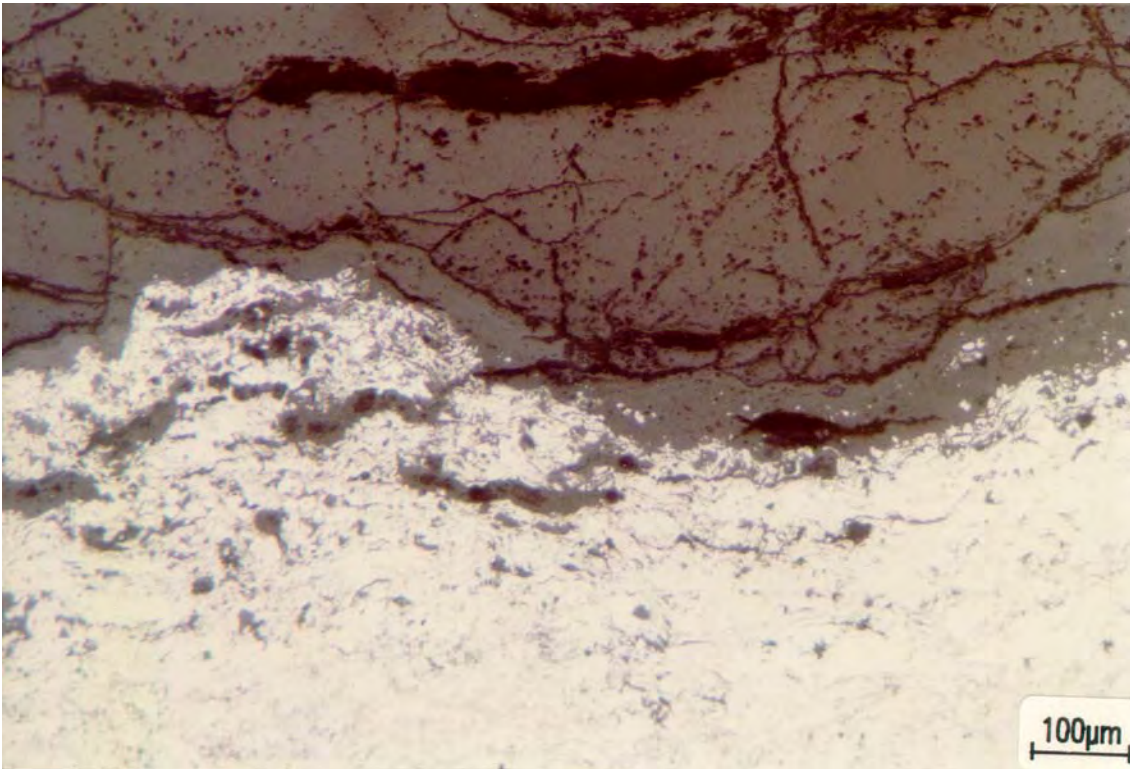


Bild B23: Grenzfläche Zink/Beton (Probekörper 1) nach 8-jähriger Freibe-  
witterung (Querschliff; Beton im oberen Teil)

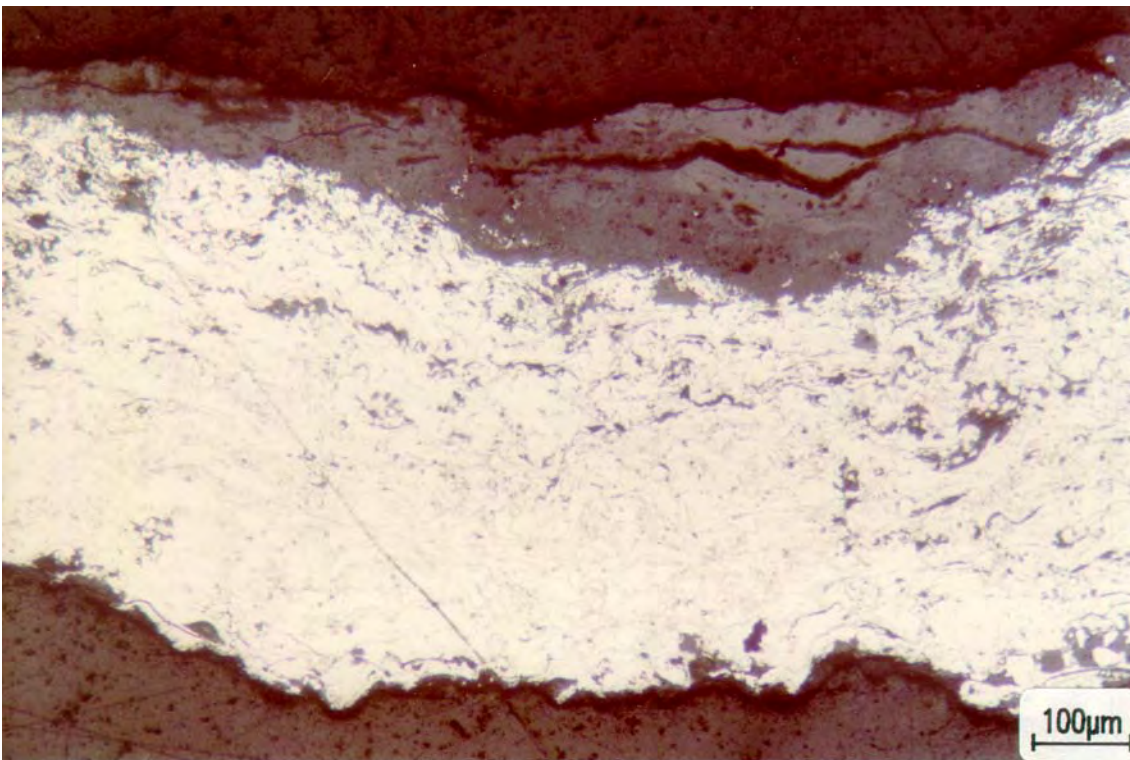


Bild B24: Grenzfläche Zink/Beton (Probekörper 2) nach 8-jähriger Freibe-  
witterung (Querschliff; Beton im oberen Bildteil)



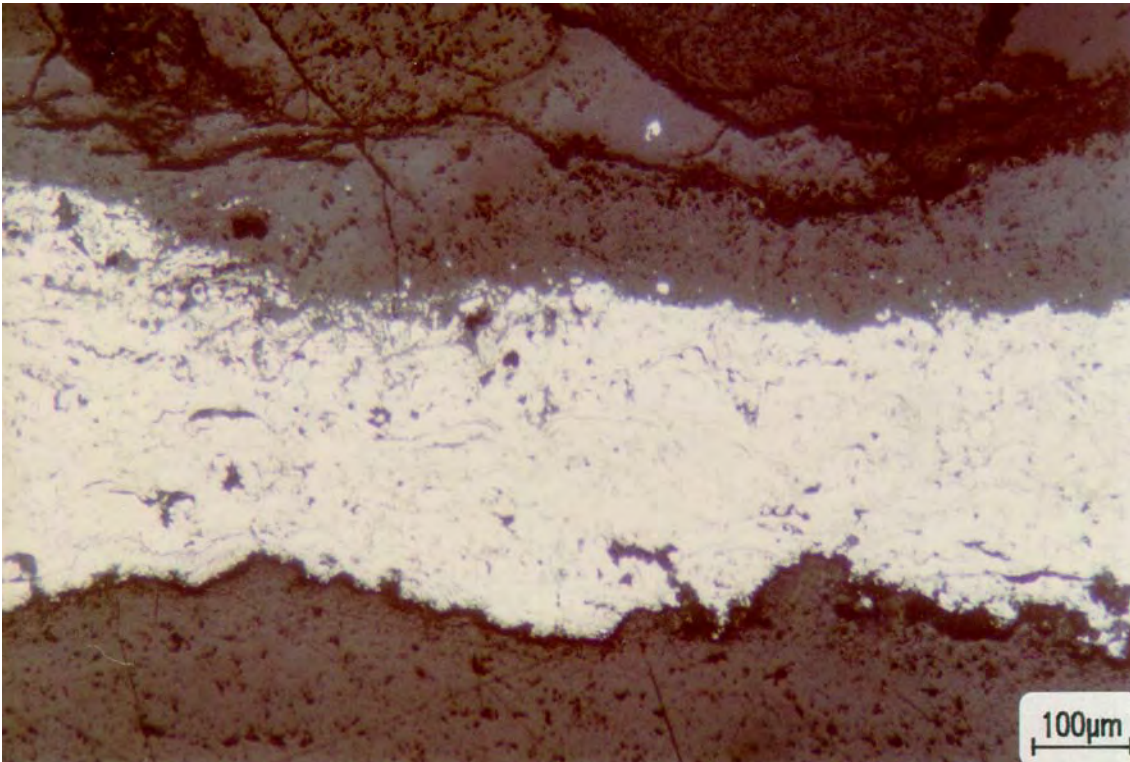
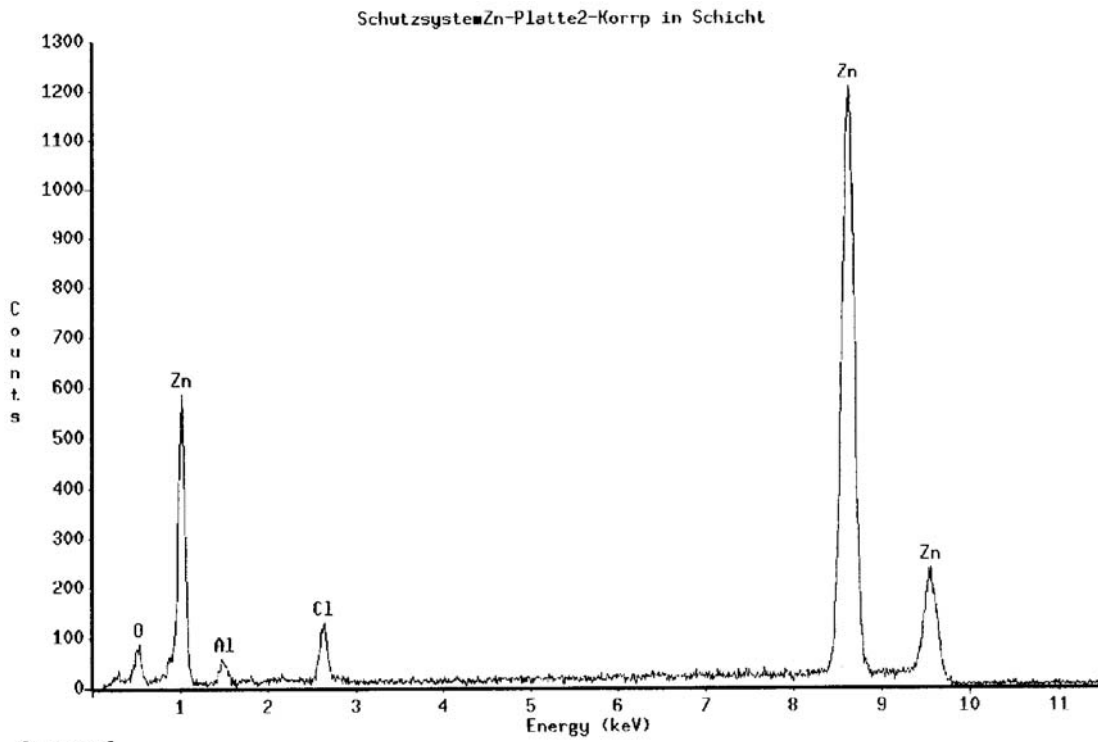


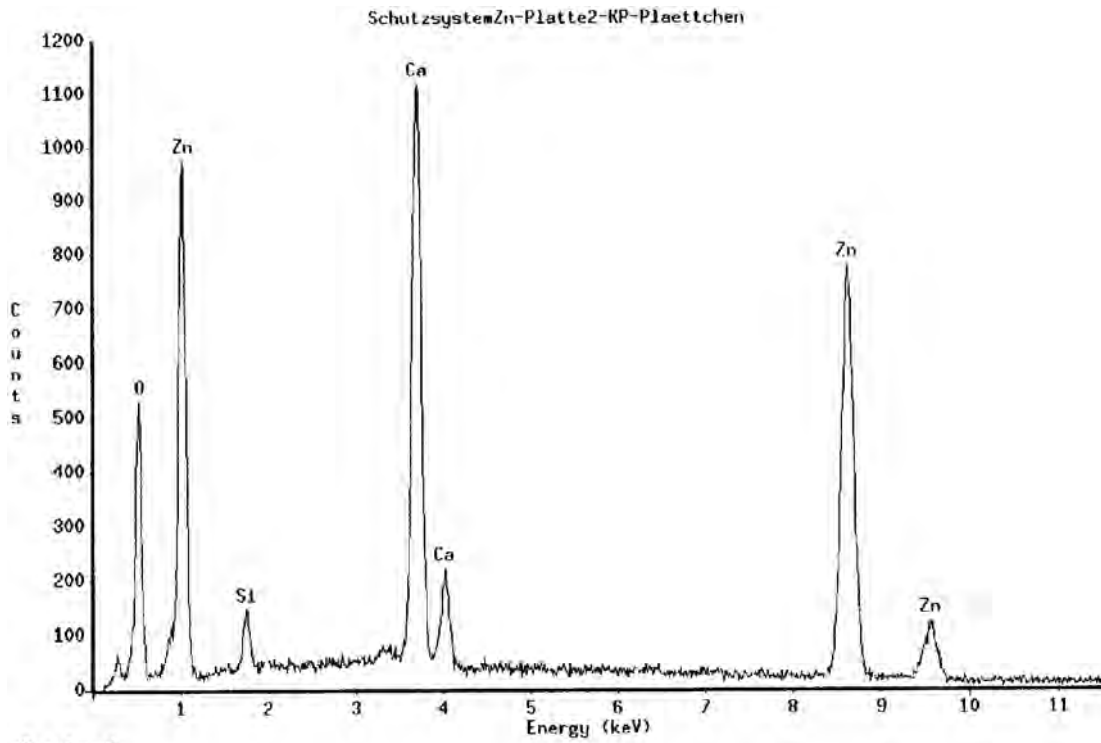
Bild B25: Grenzfläche Zink/Beton (Probekörper 3) nach 8-jähriger Freibe-  
witterung (Querschliff; Beton im oberen Bildteil)



PROZA Correction Acc.Volt.= 20 kV Take-off Angle=30.00 deg  
 Number of Iterations = 4

Element	Atom %	Element	Wt %
O -K	14.31		4.08
Al-K	3.48		1.67
Cl-K	2.83		1.79
Zn-K	79.38		92.46
Total	100.00		100.00

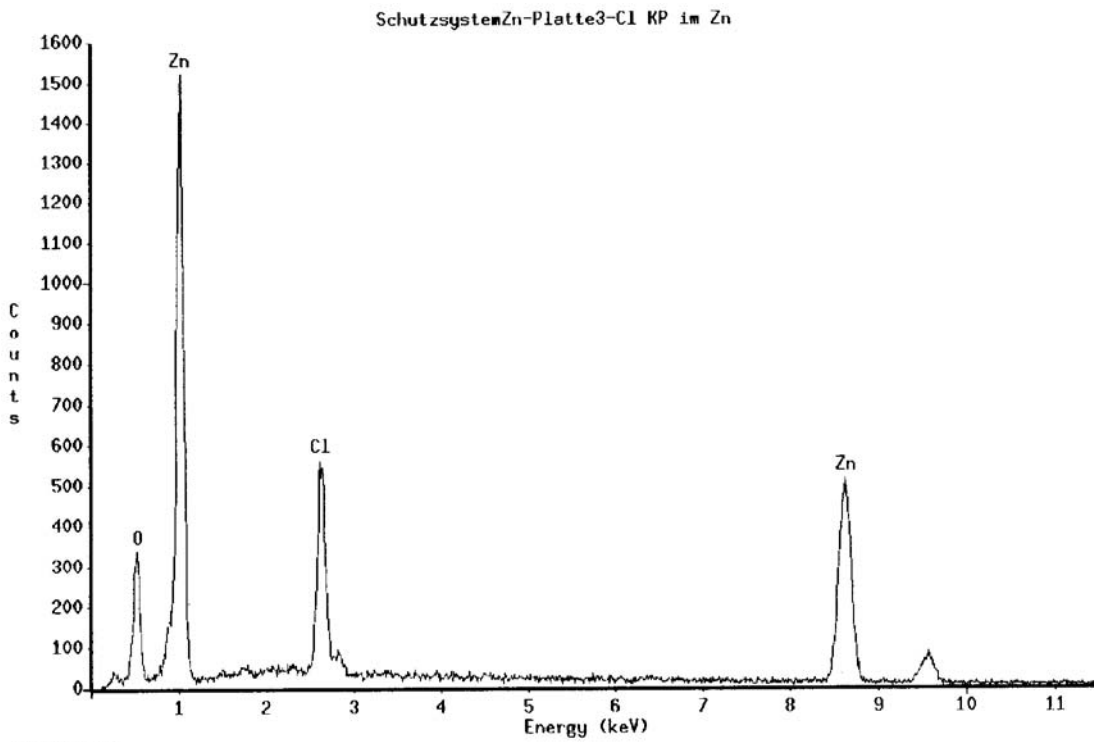
Bild B26: EDX-Analyse zu Bild B5



PROZA Correction Acc.Volt.= 20 kV Take-off Angle=30.00 deg  
 Number of Iterations = 5

Element	Atom %	Element Wt %
O -K	61.65	31.39
Si-K	1.59	1.42
Ca-K	11.51	14.68
Zn-K	25.24	52.51
Total	100.00	100.00

Bild B27: EDX-Analyse zu Bild B20



Spectrum5

PROZA Correction Acc.Volt.= 20 kV Take-off Angle=30.00 deg  
 Number of Iterations = 5

Element	Atom %	Element Wt %
O -K	59.56	28.99
Cl-K	10.34	11.16
Zn-K	30.10	59.86
Total	100.00	100.00

Bild B28: EDX-Analyse zu Bild B21