



Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten

**Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état
des ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures**

**Corrosion inhibitors for the rehabilitation of chloride
contaminated reinforced concrete structures**

**TFB, Techn. Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg
Fritz Hunkeler, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH/SIA
Björn Mühlan, M. Eng., dipl. Bauing. FH
Heidi Ungricht, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH
(heute Tiefbauamt Kanton Graubünden)**

**Forschungsauftrag AGB 2002/016 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brückenforschung (AGB)**

August 2010

630

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion: Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall' Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridver- seuchter Stahlbetonbauten

**Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état des
ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures**

**Corrosion inhibitors for the rehabilitation of chloride
contaminated reinforced concrete structures**

TFB, Techn. Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg

Fritz Hunkeler, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH/SIA

Björn Mühlan, M. Eng., dipl. Bauing. FH

**Heidi Ungricht, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH (heute Tiefbauamt Kanton
Graubünden)**

**Forschungsauftrag AGB 2002/016 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brü-
ckenforschung (AGB)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Fritz Hunkeler, TFB AG, Wildegg

Mitglieder

Björn Mühlan, TFB AG, Wildegg

Dr. Heidi Ungricht, TFB AG, Wildegg (heute Tiefbauamt Kanton Graubünden)

Begleitkommission

Präsident

Dr. Martin Käser, Baudirektion / TBA, Walcheplatz 2, 8090 Zürich

Mitglieder

Dr. Walter Kaufmann, dsp Ingenieure & Planer AG, Stationsstrasse 20, 8606 Greifensee

Prof. Dr. Albin Kenel, Hochschule für Technik HSR, Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

Antragsteller

TFB AG, Wildegg

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> herunter geladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
2 Ziel des Projektes und Vorgehen	17
2.1 Projektziele.....	17
2.2 Literaturstudium und Evaluation der zu prüfenden Systeme	17
2.3 Laborversuche Teil 1: Auswirkung des Auftrags von Inhibitoren auf Betonausbruchflächen vor der Reprofilierung auf den Haftverbund Instandsetzungsmörtel/Altbeton.....	17
2.4 Laborversuche Teil 2: Anwendung von Instandsetzungsmörteln und Inhibitor (Simulation der Korrosion der Bewehrung im Altbeton).....	18
2.5 Schlussbericht	18
3 Literaturstudium	19
3.1 Einleitung.....	19
3.2 Marktübersicht und Produktinformationen	21
3.3 Neue Untersuchungen zum kurativen Einsatz von Inhibitoren (eher negativ).....	23
3.4 Neue Untersuchungen zum kurativen Einsatz von Inhibitoren (eher positiv)	30
3.5 Untersuchungen in der Schweiz	40
3.6 Zusammenfassung und Folgerungen	44
4 Laboruntersuchungen Teil 1: Haftverbund	45
4.1 Prüfkörper.....	45
4.1.1 Angaben zum Beton	46
4.1.2 Nachbehandlung	47
4.1.3 Untergrundvorbereitung	47
4.1.4 Applikation Korrosionsinhibitor	47
4.1.5 Applikation Mörtel.....	48
4.2 Haftzugprüfungen.....	49
4.2.1 Versuchsdurchführung	49
4.2.2 Resultate	49
4.2.3 Beurteilung	50
5 Laboruntersuchungen Teil 2: Korrosion	51
5.1 Prüfkörper.....	51
5.1.1 Angaben zum Beton	52
5.1.2 Nachbehandlung	53
5.1.3 Auslagerungsperiode I	53
5.1.4 Untergrundvorbereitung	53
5.1.5 Applikation Korrosionsinhibitor	54
5.1.6 Applikation Mörtel.....	55
5.1.7 Auslagerungsperiode II	56
5.1.8 Korrosionstechnische Messungen während der Auslagerung II.....	56
5.1.9 Klimatische Bedingungen während Auslagerung	57
5.2 Haftzugprüfungen.....	58
5.2.1 Versuchsdurchführung	58
5.2.2 Resultate	58
5.2.3 Beurteilung	61
5.3 Korrosionstechnische Messungen	61
5.3.1 Korrosionspotenzial	61
5.3.2 Potenzialdifferenz Betonstahl / nichtrostende Bewehrung.....	68
5.3.3 Spezifischer elektrischer Betonwiderstand	69
5.3.4 Korrosionsabtragsrate (Korrosionsgeschwindigkeit).....	74
5.3.5 Vergleichende Betrachtungen der Systeme.....	82
5.4 Chloridprofile	86
5.5 Korrosionszustand (visuell).....	87

6	Folgerungen	91
6.1	Prüfkörper und Messkonzept.....	91
6.1.1	Prüfkörper	91
6.1.2	Messkonzept.....	92
6.2	Wirkung der Instandsetzung mit Inhibitoren	93
6.2.1	Korrosion.....	93
6.2.2	Chloridprofile	94
6.2.3	Haftverbund.....	95
6.3	Weitere Aspekte.....	95
	Anhänge.....	97
	Literaturverzeichnis.....	125
	Projektabschluss	131
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....	135

Zusammenfassung

Inhibitoren (hier Korrosionsinhibitoren) werden in verschiedenen Industriezweigen mit Erfolg zur Reduktion bzw. Kontrolle der Korrosionsgeschwindigkeit eingesetzt. Beim Stahlbetonbau liegen die ersten Anwendungen schon mehrere Jahrzehnte zurück. Dabei muss grundsätzlich zwischen der Anwendung für Neubauten und der Anwendung im Rahmen von Instandsetzungen unterschieden werden.

Der Einsatz von Inhibitoren zur Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen könnte in vielen Fällen eine sehr wirtschaftliche Massnahme sein, da der in der Regel erforderliche aufwendige Betonersatz minimiert oder sogar ganz wegfallen könnte. Im europäischen Normenwerk ist der Einsatz von Inhibitoren als eines der Prinzipien für den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauten aufgeführt (SN EN 1504-9, Prinzip 11.3).

Der Schwerpunkt dieses Forschungsauftrages lag bei der Evaluation, der Prüfung und Beurteilung von Inhibitoren zur Instandsetzung von chloridverseuchtem Beton als Massnahme gegen die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. Die Korrosion der Bewehrung wegen karbonatisiertem Beton war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Bei der Vorevaluation wurden neben der Literaturrecherche Kontakte zu Anbietern hergestellt mit dem Ziel, vorab die neuesten Produktentwicklungen einzubeziehen. Aus einer Liste von möglichen Produkten und Anbietern wurden drei Produkte für den Teil 1 der Laborversuche ausgewählt.

Beim Teil 1 der Laborversuche wurden drei Inhibitorprodukte und eine Mörtelschicht auf die dafür hergestellten Grundkörper aufgebracht. Auf Grund der Haftzugfestigkeiten wurden zwei Produkte für den Teil 2 der Untersuchungen ausgewählt. Ergänzend dazu wurde ein bekanntes und heute oft angewendetes Produkt geprüft.

Der Teil 2 der Untersuchungen mit den drei ausgewählten Systemen gliederte sich in mehrere Etappen:

- Herstellung der bewehrten Prüfkörper mit Beton mit einem Chloridgehalt von 0, 0,8, 2 und 4 M.%/Zementgehalt
- Auslagerung der Prüfkörper an Aussenatmosphäre zur Initiierung der Korrosion (Juli 2007 bis April 2008, ca. 8 Monate) und periodische Messung korrosionstechnischer Grössen
- Instandsetzung: Hochdruckwasserstrahlen der Prüfkörper, Applikation des Inhibitors und Auftrag des Instandsetzungsmörtels (mit oder ohne Inhibitor) (Mai – Juli 2008)
- Auslagerung der instand gesetzten Prüfkörper (August 2008 bis Sept. 2009, 13 Monate) und periodische Messung korrosionstechnischer Grössen
- Abschlussmessungen, Ausbau der eingebauten Bewehrungsstäbe.

Die umfangreichen korrosionstechnischen Messungen vor und nach der Instandsetzung sowie die visuelle Beurteilung der ausgebauten Stahlstäbe führten zur Erkenntnis, dass keines der drei geprüften Inhibitorsysteme die laufende chloridinduzierte Korrosion an der Bewehrung zu reduzieren vermochte. Diese Aussage gilt selbst bei der sehr geringen Bewehrungsüberdeckung von nur 10 mm. Bei allen geprüften Systemen konnten eine erhebliche Diffusion (Wanderung) der Chloride aus dem Untergrund (Altbeton) in den neuen Instandsetzungsmörtel festgestellt werden.

Dieses ernüchternde Resultat ist mit einiger Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass sich das Korrosionsmedium in unmittelbarer Umgebung des Stahls bei laufender Korrosion stetig ändert (verschärft) und die sich entwickelnden Korrosionsprodukte zusätzliche chemische und physikalische Hindernisse darstellen und so verhindern, dass der Inhibitor in ausreichender Konzentration an die Stahloberfläche gelangen und seine Wirkung entfalten kann. Es kann zudem auch sein, dass die gewählten Chloridgehalte von 2 und 4 M.%/Z zu hoch angesetzt waren bzw. die dadurch verursachte Korrosion zu

intensiv war. Einzelne Produkthersteller geben in ihren Produktdatenblättern Hinweise zum maximalen Chloridgehalt (beispielsweise wird der Einsatz von SikaFerroGard-903 bei Chloridgehalten über 1 M.%/Z nicht empfohlen).

Es ist möglich, dass dann, wenn die Bewehrung noch nicht oder nur wenig korrodiert, die Anwendung von Inhibitoren eher erfolgreich ist und dabei die Höhe des Chloridgehaltes eine geringere Rolle spielt. Diese Situation wurde hier aber nicht untersucht.

Die Ergebnisse der durchgeführten praxisnahen Laborversuche decken sich nur mit einem Teil der Literatur. Insgesamt sind die Literaturergebnisse sehr widersprüchlich und vermitteln eher ein optimistischeres Bild. Einige Widersprüche sind auf den Korrosionszustand der Bewehrung und das Fehlen von Rostprodukten auf der Stahloberfläche beim Versuch sowie auf das Fehlen der Makroelementwirkung zurückzuführen.

Die Untersuchungen erlaubten, Empfehlungen für die Prüfung von neuen Produkten und Systemen zu machen. Vor deren praktischen Einsatz sollten diese auf jeden Fall im Labor geprüft werden.

Die durchgeführten Untersuchungen und die Ergebnisse können nicht bzw. nur mit Einschränkungen auf die Korrosion der Bewehrung infolge Karbonatisierung des Betons übertragen werden.

Weiter Forschungsbedarf ist bei Chloridgehalten zwischen 1 und 2 M.%/Z und unterschiedlicher Intensität der Vorkorrosion vorhanden.

Résumé

Les inhibiteurs (ici inhibiteurs de corrosion) sont utilisés avec succès dans différentes branches industrielles dans le but de réduire, respectivement de contrôler la vitesse de corrosion. Dans le béton armé, les premières applications ont eu lieu il y a plusieurs décennies. Il convient de distinguer les applications dans le cadre de nouvelles constructions de celles dans le cadre de remises en état.

L'utilisation d'inhibiteurs pour le remise en état d'éléments d'ouvrage en béton armé pourrait constituer une mesure très économique, car la substitution normalement nécessaire, mais onéreuse du béton peut être réduite, voire supprimée. La réglementation normative européenne inclut l'utilisation d'inhibiteurs comme un des principes de base pour la protection et la remise en état des ouvrages en béton armé (SN EN 1504-9, principe 11.3).

L'accent de ce mandat de recherche a été mis sur l'évaluation, l'essai et l'appréciation des inhibiteurs pour la remise en état du béton contaminé par des chlorures en tant que mesure contre la corrosion induite par les chlorures. La corrosion de l'armature dans le béton carbonaté ne fait pas partie de ce travail.

L'évaluation préliminaire comprenait outre une recherche bibliographique la prise de contact avec les fournisseurs afin de tenir compte des derniers développements des produits. Sur la base d'une liste de produits et fournisseurs possibles, trois produits ont été sélectionnés pour la première partie des essais de laboratoire.

Lors de la première partie des essais de laboratoire, trois produits inhibiteurs et une couche de mortier ont été appliqués sur les substrats. Basé sur les résistances à la traction par arrachement, deux produits ont ensuite été sélectionnés pour la deuxième partie des investigations. En complément, un troisième produit bien connu et actuellement souvent utilisé dans la pratique a également été essayé.

La deuxième partie des investigations avec les trois systèmes retenus s'est déroulée en plusieurs phases :

- Confection d'éprouvettes armées avec des bétons contenant différentes quantités de chlorures (teneurs en chlorures : 0, 0,8, 2 et 4 %-masse de ciment)
- Conservation à l'extérieur des éprouvettes pour initier la corrosion (juillet 2007 à avril 2008, env. 8 mois) et mesures périodiques des paramètres de corrosion
- Remise en état : Traitement de surface au jet d'eau à haute pression, application de l'inhibiteur et du mortier de réparation (avec ou sans inhibiteur) (mai à juillet 2008)
- Conservation à l'extérieur des éprouvettes remises en état (août 2008 à septembre 2009, 13 mois) et mesures périodiques des paramètres de corrosion
- Mesures finales, extraction des barres d'armatures.

La vaste campagne de mesure des paramètres de corrosion avant et après la remise en état ainsi que l'examen visuel des barres d'armatures extraites mettent en évidence qu'aucun des trois systèmes d'inhibiteur testés n'était en mesure de diminuer une corrosion active de l'armature induite par des chlorures. Cette constatation vaut même pour l'enrobage d'armature très faible de seulement 10 mm. Une diffusion (migration) significative des chlorures du béton original vers le nouveau mortier de réparation a été constatée pour tous les systèmes essayés.

Ce résultat peu encourageant est vraisemblablement dû au fait qu'en cas de corrosion active le milieu de corrosion à proximité immédiate de l'acier se modifie constamment (c.à.d. devient plus agressif) et que les produits de corrosion qui se développent forment des barrières chimiques et physiques supplémentaires empêchant l'inhibiteur d'accéder en quantité suffisante à la surface de l'acier pour être efficace. Il est envisageable que les teneurs en chlorures de 2 et 4 %-m.c. choisies fussent trop élevées causant une

corrosion trop intensive. Certains fabricants indiquent dans leurs fiches de produit des teneurs en chlorures limites (p.ex. l'utilisation de Sika FerroGard-903 n'est pas recommandée en cas de contamination en chlorures supérieure à 1 %-masse de ciment.

Il est possible que l'application des inhibiteurs soit plutôt couronnée de succès lorsque l'armature ne corrode pas encore ou corrode seulement faiblement et que le taux de contamination en chlorures est moins important. Or cette situation n'a pas été investiguée dans le cadre de ce projet.

A noter que les résultats des essais de laboratoire axés sur la pratique concordent seulement partiellement avec les résultats trouvés dans la littérature. De manière générale, les résultats dans la littérature sont très contradictoires et dessinent une image plus optimiste. Certaines des contradictions sont dues à l'état de corrosion de l'armature, à l'absence de dépôts de rouille à la surface d'acier lors de l'essai et à l'absence d'un effet de macro-élément.

Les investigations ont permis d'établir des recommandations concernant la méthode d'essai pour tester des nouveaux produits et systèmes. Avant la mise en œuvre pratique d'un nouveau produit ou système, il est vivement conseillé de l'essayer en laboratoire.

Les investigations réalisées et les résultats obtenus ne peuvent être, ou seulement sous réserve, reportés sur la corrosion de l'armature dans du béton carbonaté.

Un besoin de recherche supplémentaire a été identifié par rapport à une contamination en chlorures qui se situe entre 1 et 2 %-masse de ciment. ainsi que par rapport à l'intensité variable de la corrosion initiale.

Summary

Inhibitors (here corrosion inhibitors) are successfully used in various industries to reduce and/or control the corrosion rate. The first applications in the field of reinforced concrete structures date back several decades. Thereby one needs to distinguish between the use for new constructions and for rehabilitation of old structures.

The use of inhibitors for refurbishing reinforced concrete construction elements could in many cases be a very efficient measure, as the normally required and expensive concrete substitution can be minimized or even completely omitted. The European standard specification includes the use of inhibitors as one of the principles for the protection and the rehabilitation of concrete structures (SN EN 1504-9, principle 11.3).

This research project focuses on the evaluation, testing and assessment of inhibitors for refurbishing chloride contaminated concrete as a measure against chloride induced corrosion. The rebar corrosion in carbonated concrete is not part of this work.

In the preliminary evaluation phase, beside a literature research, providers have been approached in order to profit from their latest product developments. Based on a list of possible products and providers, three products have been chosen for the first part of the laboratory testing phase.

In the first part of the laboratory testing phase three inhibitor products and a mortar layer were applied on specifically for this purpose cast concrete substrates. Depending on the tensile bond strength, two products were chosen for the second part. In addition, one well known and often used product has been tested.

The second part of the laboratory experiment with the three chosen systems was structured as follows:

- Casting reinforced test specimens with different concrete mixtures having distinct chloride concentrations (0, 0.8, 2 and 4 %-m.c.)
- Outdoor exposure of the test specimens to initiate corrosion (July 2007 till April 2008, approx. 8 months) and periodical measurements of the corrosion parameters
- Rehabilitation: Hydrojetting of the specimens, application of the inhibitor and the repair mortar (with or without inhibitor) (May till July 2008)
- Outdoor exposure of the refurbished specimens (August 2008 till September 2009, approx. 13 months) and periodical measurements of the corrosion parameters
- Final measurements, extraction of the rebars.

The extensive measurements of the corrosion parameters before and after the rehabilitation as well as the visual examination of the extracted rebars have lead to the conclusion that none of the investigated inhibitor systems is able to reduce the active chloride induced corrosion on the rebar. This conclusion is even valid in the case of the very small concrete cover of only 10 mm. For all investigated systems significant chloride diffusion has been observed from the original concrete into the new mortar layer.

This not very encouraging result is very likely due to the fact that the corrosion medium in immediate vicinity to the steel is continuously changing (i.e. becoming more aggressive) and that the developing corrosion products form an additional chemical and physical barrier which prevents the inhibitor from reaching the steel surface in a sufficient concentration for being effective. It is also possible that the used chloride concentrations of 2 and 4 %-m.c. have been chosen too high making the corrosion too intensive. Some product producers specify in their product specifications an upper limit for chloride contamination (e.g. the use of Sika FerroGard-903 is not recommended for a chloride contamination above 1 %-m.c.).

However, the inhibitor might be more effective and less dependent on the chloride content if the rebars are not yet corroding or they are only corroding a little. This situation has not been investigated here.

The results of the practice oriented laboratory tests agree only partially with what has been reported in the literature. The literature results are very contradictory and draw a more optimistic picture. Some contradictions are related to the rebar corrosion state, the absence of rust products on the steel surface during the testing and the absence of macro-element effects.

The investigations allowed establishing recommendations regarding the testing procedure for new products and systems. In any case these should be tested in the laboratory prior to the practical use.

The investigations carried out and the results cannot (or only with restrictions) be transferred to rebar corrosion due to carbonation of the concrete.

Further work is needed and should include specimens having chloride contents between 1 and 2 %-m.c. as well as a variable intensity of the initial corrosion.

1 Einleitung

Die Korrosion der Bewehrung, ausgelöst durch die Karbonatisierung des Betons und/oder durch die in den Beton eingedrungenen Chloride, ist heute die wichtigste Ursache für Schäden an Stahlbetonbauten. Zum Schutz und zur Instandsetzung von korrosionsgeschädigten Stahlbetonbauten werden neben anderen Massnahmen auch Korrosionsinhibitoren eingesetzt.

Korrosionsinhibitoren (hier kurz Inhibitoren genannt) sind organische oder anorganische Substanzen, welche die Geschwindigkeit der Korrosion von Metallen reduzieren. Sie können bei Stahlbetonbauten entweder vorbeugend (präventiv) oder nachträglich (kurativ) eingesetzt werden, um einerseits den Beginn von Zerstörungsprozessen zu verhindern bzw. hinauszuzögern, oder um andererseits bereits ablaufende Korrosionsvorgänge zu unterbinden bzw. stark zu verlangsamen. Inhibitoren lassen sich, basierend auf ihrer Wirkung, in drei Arten unterteilen

- Adsorptionsinhibitoren
- Passivatoren
- Passivitätsfördernde Inhibitoren

Gemäss ISO 8044 (1989) sind Inhibitoren wie folgt definiert (zitiert nach [Søylev 2008]): „A chemical substance that decreases the corrosion rate when present in the corrosion system at suitable concentration, without significantly changing the concentration of any other corrosion agent.“ (Eine chemische Substanz, die, wenn sie in einer geeigneten Konzentration im Korrosionssystem vorhanden ist, die Korrosionsgeschwindigkeit reduziert, ohne dass sie die Gehalte anderer korrosionsfördernder Stoffe wesentlich verändert.)

Diese Definition schliesst andere Korrosionsschutzmethoden aus wie z.B. Oberflächenschutzsysteme, Poren verstopfende oder andere Stoffe, die den Wasser-, Sauerstoff- oder den Chloridgehalt ändern. Festzuhalten ist aber, dass einige Inhibitoren die Poren verstopfen oder die Wasseraufnahme des Betons reduzieren, was als sekundäre Eigenschaft solcher Inhibitoren bzw. Inhibitorsysteme betrachtet werden kann.

Inhibitoren sind im europäischen Normenwerk für den Schutz und die Instandsetzung als Prinzip 11.3 gemäss Norm SN EN 1504-9 „Anwendung von Korrosionsinhibitoren in oder am Beton“ [CEN 2006] anerkannt. Der Einsatz von Inhibitoren könnte in vielen Fällen eine sehr wirtschaftliche Massnahme sein, da der in der Regel zur Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen erforderliche aufwendige Betonersatz minimiert oder sogar ganz wegfallen kann.

Dabei muss grundsätzlich zwischen der Anwendung für Neubauten und der Anwendung im Rahmen von Instandsetzungen (**Tabelle 1.1**) sowie zwischen der Korrosionsursache (Chloride, karbonatisierter Beton) unterschieden werden. **Bild 1.1** zeigt die angestrebte Wirkung von Inhibitoren.

Unter der Abkürzung **MCI** (**M**igrating **C**orrosion **I**nhibitor) werden alle Arten von migrierenden (wandernden) Inhibitoren verstanden.

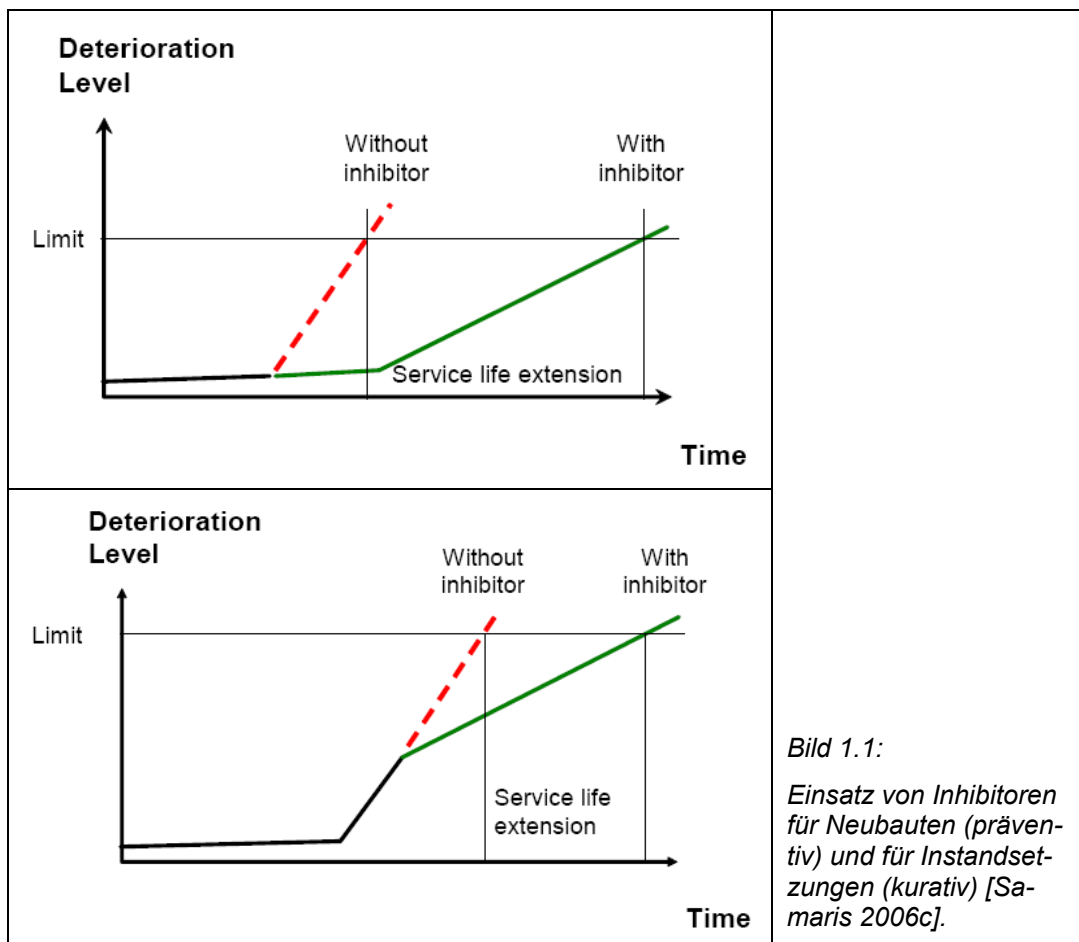
Beim Einsatz von Inhibitoren im Rahmen von Instandsetzungen kommt neben der eigentlichen inhibierenden Wirkung vor allem dem Transportweg des Inhibitors durch den Beton zur Bewehrung eine ausschlaggebende Bedeutung zu (**Bild 1.2**). Die inhibierenden Komponenten sollten auf dem Weg zur Bewehrung chemisch nicht umgewandelt werden. Eine korrosionshemmende Wirkung kann nur erzielt werden, wenn der Inhibitor (bei einem Inhibitorgemisch: alle inhibierenden Komponenten) zum richtigen Zeitpunkt und auch in einer ausreichender Menge am richtigen Ort, d.h. an der Oberfläche der Bewehrung, insbesondere auch in Korrosionsnarben und Lochfrassstellen, vorliegt.

Im Vergleich zum Neubau, kann bei Instandsetzungen von Stahlbetonbauten die gewünschte Nutzungszeit deutlich geringer sein. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn es darum geht, ein Bauteil oder Bauwerk nur noch über einen beschränkten Zeitraum zu nutzen.

Sowohl beim Einsatz für Neubauten wie auch für Instandsetzungen gibt es eine Reihe von offenen Fragen (**Bild 1.2**), für die nur teilweise gesicherte Antworten vorliegen.

Tabelle 1.1 Beispiele des Einsatzes einiger bekannter Inhibitoren zum Schutz und zur Instandsetzung von Stahlbetonbauten [Hunkeler 1998].

Inhibitor	Inhibitorart	Präventive Anwendung bei Neubauten	Nachträgliche (kurative) Anwendung bei Altbauten
Nitrit	Passivator		
FerroGard-901	Adsorptionsinhibitor		
MCI 2000	Adsorptionsinhibitor		
MFP	Zuordnung?		
FerroGard-903	Adsorptionsinhibitor		
MCI 2020	Adsorptionsinhibitor		



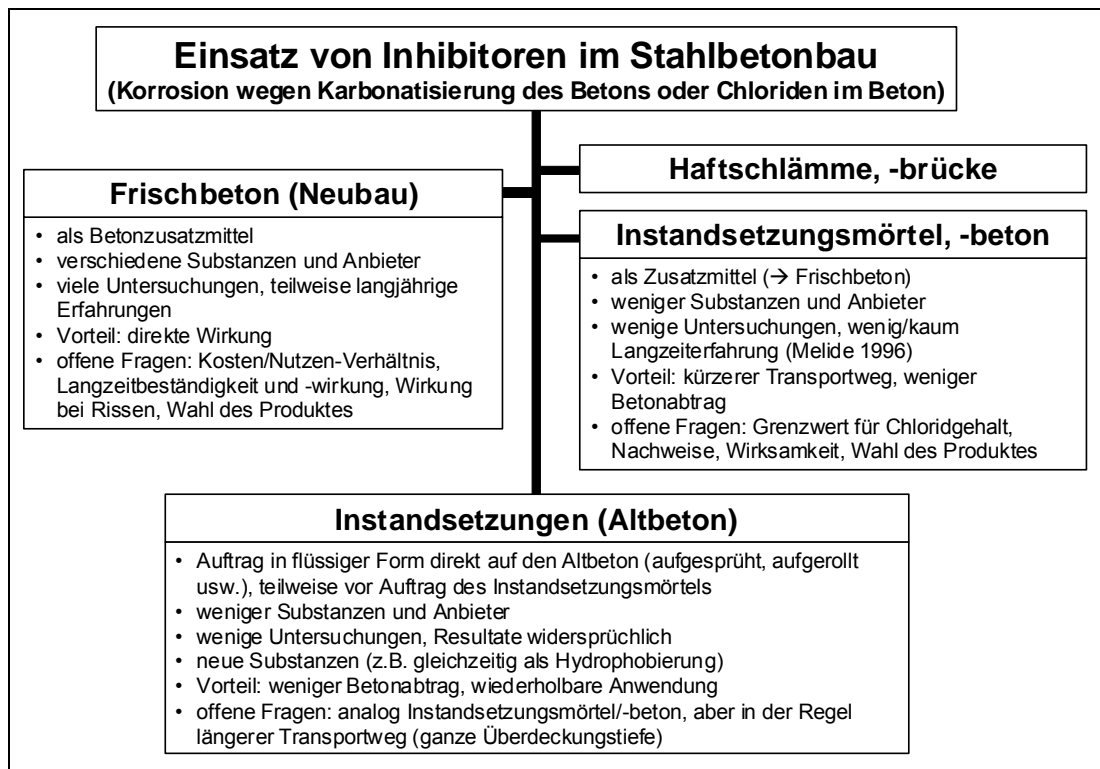


Bild 1.2 Übersicht über die Anwendung von Inhibitoren bei Stahlbetonbauten und über einige wichtige offene Fragen.

2 Ziel des Projektes und Vorgehen

2.1 Projektziele

Für Neubauten sind mehrere bewährte Massnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten bekannt. Deshalb wurde der Einsatz von Inhibitoren bei Neubauten in diesem Projekt nicht behandelt.

In Anbetracht der technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der Instandsetzung von Verkehrsbauten wurde hier der Schwerpunkt gesetzt. Dabei wurden insbesondere die neueren Entwicklungen und Möglichkeiten des Einsatzes von Inhibitoren zur Instandsetzung von chloridverseuchten Stahlbetonbauten berücksichtigt. Aus den Resultaten sollten Hinweise für eine zu erarbeitende Empfehlung zum Einsatz von Inhibitoren sowie für Pilotanwendungen abgeleitet werden. Das Projekt ging damit in der Zielsetzung wesentlich weiter als das sehr umfangreiche EU-Projekt SAMARIS [Samaris 2003, 2004] (Details s. **Kapitel 3**).

Das Projekt hatte mehrere Teilziele: Literaturstudium und Evaluation der neuesten Produkte und Systeme; Planung, Durchführung und Auswertung der Resultate der Laborversuche Teil 1 (Haftverbund) und 2 (Inhibierung der Korrosion).

2.2 Literaturstudium und Evaluation der zu prüfenden Systeme

- Sichten und Auswerten der vorhandenen Berichte und Publikationen unter besonderer Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen
- Kontaktnahme mit andern Forschungsstellen und Herstellern/Anbietern von Inhibitoren
- Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der in- und ausländischen Forschungsarbeiten hinsichtlich der Anwendung und Wirksamkeit von Inhibitoren
- Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse bei der praktischen Anwendung (Feldversuche und konkrete Anwendungen) hinsichtlich Wirksamkeit, Überwachungsmethoden (Monitoring) und Langzeiterfahrung
- Evaluation der Erfolg versprechenden Produkte für die Laborversuche.

2.3 Laborversuche Teil 1: Auswirkung des Auftrags von Inhibitoren auf Betonausbruchflächen vor der Reprofilierung auf den Haftverbund Instandsetzungsmörtel/Altbeton

Bei allen Instandsetzungen mit Reprofilierungsmörteln ist der Haftverbund des Mörtels auf dem Altbeton von grosser Bedeutung. Mit den durchgeführten Laborversuchen sollten die Auswirkungen des Auftrags von Inhibitoren auf Betonausbruchflächen untersucht werden, wie sie bei Instandsetzungen nach dem Betonabtrag entstehen. Insbesondere ging es um die Auswirkungen der Inhibitorapplikation auf die Haftzugfestigkeit von Instandsetzungsmörteln, die für die Reprofilierung von Betonausbruchflächen und Schadstellen eingesetzt werden.

Laborprogramm Teil 1 (Auswirkungen auf die Haftzugfestigkeit):

- Herstellung der Prüfkörper: Platten (Abmessung: ca. 400 x 400 x 100 mm³) mit und ohne chloridverseuchten Beton (Chloridgehalt 0 und 2 M.%/Z).
- Nachbehandlung der Platten.
- Nach 28 Tagen wurden die Platten vorbereitet (Untergrund aufräumen) und mit Korrosionsinhibitoren und Mörtel beschichtet. Es wurden 3 verschiedene Produktsysteme geprüft. Als Referenz diente der Untergrundbeton.
- Messung der Haftzugfestigkeit nach 28 Tagen.

Auf Basis der Resultate der Haftzugprüfungen wurden 2 Produktsysteme für den Teil 2 der Laborversuche ausgewählt.

2.4 Laborversuche Teil 2: Anwendung von Instandsetzungsmörteln und Inhibitor (Simulation der Korrosion der Bewehrung im Altbeton)

Mit diesen Laborversuchen sollten die Gegebenheiten bei der Anwendung von Inhibitoren zur Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen mit chloridinduzierter Korrosion an der Bewehrung im Labormassstab simuliert und die Wirksamkeit von Inhibitoren geprüft werden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Herstellung und Instrumentierung der Prüfkörper: Es wurden bewehrte Platten 400 x 400 x 100 mm³ mit und ohne chloridverseuchtem Beton hergestellt (Chlorid-Zugabe zum Anmachwasser, Chloridgehalt: 0, 0,8, 2 und 4 M.-%/Z).
- In die Platten wurden mehrere Stahlstäbe mit abgestuften Betonüberdeckungen aus normalem Betonstahl und eine Netzbewehrung aus nichtrostendem Stahl zur Simulation des Makroelementes zwischen korrodierender und nicht korrodierender Bewehrung eingebaut.
- Nachbehandlung der Platten.
- 9-monatige Auslagerung auf dem Dach der Forschungsstelle (direkt bewittert).
- Nach der 9-monatigen Korrosionszeit wurden die Platten mit Inhibitor und Mörtel beschichtet.
- Anschliessende erneute Auslagerung der (reprofilierten) Platten: im Freien auf dem Gelände der Forschungsstelle (direkt bewittert).
- Monitoring der Korrosionsströme vor und nach der simulierten Instandsetzung über insgesamt fast 2 Jahre, d.h. Messung von Ausbreitungswiderstand, Spannungsdifferenz und Stromfluss (=Mass für die Korrosionsgeschwindigkeit) zwischen korrodierender und nicht korrodierender Bewehrung sowie des Korrosionspotenzials der Bewehrung.
- Messung der Haftzugfestigkeit über den korrodierenden Bewehrungsstäben nach Abschluss der Versuche.
- Ermittlung der Chloridprofile im Mörtel und Betonuntergrund.
- Ausbau der Betonstähle und Charakterisierung des Korrosionsangriffs.

2.5 Schlussbericht

Im Schlussbericht sollten folgende Fragen beantwortet werden können:

- Wann ist die Anwendung von Inhibitoren für die Instandsetzung von Stahlbetonbauten sinnvoll und wirtschaftlich?
- Welche Produkte können unter welchen Umständen erfolgreich angewendet werden (maximaler Restchloridgehalt im Beton)?
- Wie soll der Betonuntergrund vorbehandelt werden?
- Wie hoch darf der verbleibende Restchloridgehalt im Beton sein?
- Wie gross sind die möglichen Transportwege für Inhibitoren im Beton (maximal zulässige Überdeckung vor der Applikation des Inhibitors)?
- Wie kann/soll das Bauwerk nachträglich überwacht werden?
- Wie können in Zukunft neue Produkte geprüft und beurteilt werden?

Die Antworten auf diese Fragen sollen die Basis für eine Empfehlung zum Thema bilden.

3 Literaturstudium

3.1 Einleitung

Ende der 1980er Jahre wurde das Strategic Highway Research Program (SHRP C-103, [FHWA 2002]) gestartet. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde auch die Anwendbarkeit von Inhibitoren zur Bekämpfung der Bewehrungskorrosion untersucht. In einem Folgeprogramm wurden Pilotversuche wie auch Feldstudien durchgeführt. Diese Arbeiten lösten weltweit eine rege Forschungstätigkeit aus. Nach ersten Rückschlägen und nach vielen – häufig gescheiterten – Versuchen mit immer neuen Inhibitortypen zeigte sich Ende der 1990er Jahre eine gewisse Ernüchterung.

In den letzten Jahren konnte eine erneute Zunahme der Forschungstätigkeit beobachtet werden (z.B. Deutschland, Frankreich, USA, Kanada, Australien, Griechenland, Grossbritannien). Dies ist nicht überraschend, hat der Einsatz von Inhibitoren doch wesentliche Vorteile gegenüber vielen konventionellen Instandsetzungsmassnahmen. Vorab der möglicherweise deutlich geringere Betonabtrag fällt wirtschaftlich ins Gewicht. Dies ist Anreiz genug, um die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Inhibitoren weiter auszuloten.

Mit dem Inhibitor Kalziumnitrit liegen weltweit die umfangreichsten und längsten Erfahrungen vor (über 20 Jahre). Mehr oder weniger übereinstimmend zeigen die Resultate aus der Forschung und Anwendung, dass der kritische Chloridgehalt für die chloridinduzierte Korrosion erhöht und damit der Korrosionsbeginn wesentlich verzögert werden kann (z.B. [Prabakar 2009]). In Deutschland wurde dieser Inhibitor auf Grund der Untersuchungen des ibac in Aachen [ibac 2001, Schiessl 2002] vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT) als neue Wirkgruppe von Betonzusatzmitteln („Passivator“) zugelassen. Als grosser Nachteil dieses Inhibitors ist das Risiko der verstärkten (lokalen) Korrosion zu beachten, wenn er unterdosiert oder verbraucht ist oder ausgewaschen wird.

Zur präventiven Wirkung von Inhibitoren liegen mittlerweile sehr viele Publikationen vor. Als Beispiel sind die positiven Resultate von Untersuchungen in Porenlösungen gezeigt (**Bild 2.1**) [Omellese 2006]. Diese Ergebnisse ermunterten viele Forschungsstellen wie auch Eigentümer von gefährdeten Stahlbetonbauten dazu, neue Inhibitoren zu suchen und auch deren Einsatz für kurative Anwendungen zu untersuchen. So zeigten z.B. Versuche mit inhibitorhaltigen Instandsetzungsmörteln, dass der Korrosionsbeginn hinausgezögert oder die Korrosionsgeschwindigkeit reduziert werden konnten [FHWA 2001]. Die präventive Wirkung von Inhibitoren bei chloridbelasteten Beton wird durch die gleichzeitige Karbonatisierung erschwert [Yongmo 2004].

In den letzten Jahren wurden mehrere Forschungsarbeiten mit zum Teil ganz neuen Inhibitoren in den USA sowie in andern Ländern durchgeführt [FHWA 2001, Civjan 2003, Sprinkel 2003, VDOT 2003a, VDOT 2003b, NJ DOT 2008, Al-Mehthel 2009]. Verschiedene Kombinationen von mineralischen Zusatzstoffen und chemischen Zusatzmitteln wurden in Laborversuchen getestet [Civjan 2003]. Der neue Inhibitor DSS (Disodium Tetrapropenyl Succinate) zeigte alleine oder zusammen mit Kalziumnitrit die beste Wirkung von allen untersuchten Mischungen. Es wurde empfohlen, DSS weiter zu untersuchen. Der erste bekannte Pilotversuch mit diesem Inhibitor wird an Leitmauern in Connecticut durchgeführt (Versuchszeit bis 2008) [Internet 2004a] (**Bild 3.2**). In [Distlehorst 2007] wurden die Auswirkungen von Hycrete DSS auf die Festbetoneigenschaften untersucht. Arbeiten zur nachträglichen Applikation dieses Inhibitors liegen bisher nicht vor.

Auch in anderen Arbeiten zeigten verschiedene neuere Inhibitoren eine bessere Wirkung als Kalziumnitrit [VDOT 2003a]. In England laufen ebenfalls Untersuchungen mit verschiedenen Inhibitoren durchgeführt, die auf die Oberfläche von Altbeton appliziert werden [Page 2000, Internet 2004b].

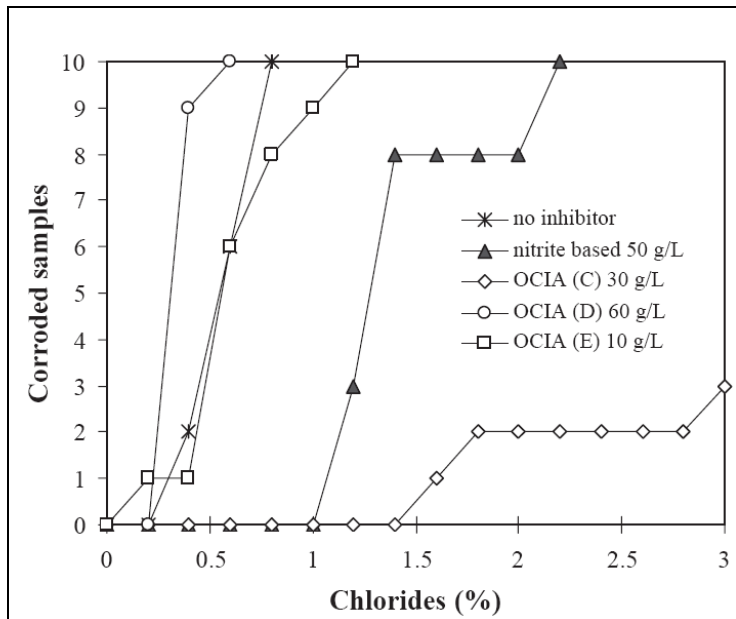


Bild 3.1:

Anzahl der korrodierten Proben in Abhängigkeit vom Chloridgehalt im simulierten Porenwasser und Wirkung verschiedener Inhibitoren (Nitrit, organische Inhibitoren C, D und E) [Omellese 2006].



Bild 3.2:

Pilotversuch mit dem Inhibitor DSS (Zusatzmittel für den Beton) an Leitmauerelementen in Connecticut [Internet 2004a].

Um dem Bedürfnis nach qualifizierter und gesicherter Information über die Wirkung von Inhibitoren Rechnung zu tragen, wurde von der ASTM eine entsprechende Norm erarbeitet [ASTM 2005]. Sie beschreibt ein Prüfverfahren, mit dem die präventive Wirkung von Inhibitoren auf die Bewehrungskorrosion geprüft werden kann. Der Inhibitor wird dabei der Betonmischung zugegeben. Die Probekörper werden zyklisch mit einer chloridhaltigen Lösung beaufschlagt. Dabei wird die Entwicklung der Korrosion messtechnisch verfolgt. Das Prüfverfahren wurde bei verschiedenen Arbeiten, nicht nur in den USA, angewendet. Die Methode wurde aber auch benutzt, um die Wirkung von oberflächlich aufgetragenen Inhibitoren zu prüfen (z.B. [Bennett 2005]).

In den folgenden Kapiteln werden die Resultate von Untersuchungen zusammengefasst, die seit der Publikation des Berichts über die Feldversuche im Naxbergtunnel [Hunkeler 2001], durchgeführt wurden. Dabei wird folgende Abgrenzung gemacht:

- Es werden vorab Arbeiten berücksichtigt, die sich mit der kurativen Anwendung von Inhibitoren beschäftigen (oberflächliche Applikation oder im Instandsetzungsmörtel oder –beton), d.h. Untersuchungen zur präventiven Anwendung (Zugabe als Zusatzmittel) bei neuem, chloridfreiem Beton werden nicht einbezogen.
- Nitrit und MFP werden nicht bzw. nur am Rande behandelt.
- Resultate von Untersuchungen im Porenwasser werden nicht berücksichtigt.
- Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften werden nicht berücksichtigt.

Im folgenden **Kapitel 3.2** wird eine Übersicht über die heute im Markt vorhandenen Inhibitoren gegeben. Im anschliessenden **Kapitel 3.3** werden Untersuchungen mit eher negativen Ergebnissen, und im **Kapitel 3.4** solche mit zumindest teilweise bzw. eher positiven Ergebnissen vorgestellt. Im **Kapitel 3.5** folgen die Erfahrungen, die in der Schweiz mit Inhibitoren gemacht worden sind. Im **Kapitel 3.6** werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

3.2 Marktübersicht und Produktinformationen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass weltweit viele Anstrengungen zur Entwicklung von erfolgreichen Produkten unternommen wurden. Die Ergebnisse zum Einsatz und zur Wirksamkeit von Inhibitoren sind aber teilweise widersprüchlich. Eine zusammenfassende Darstellung mit einer Bewertung der gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse ist nicht vorhanden. Ebenfalls fehlen vergleichende Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit. Die Basis der heutzutage gebräuchlichen Inhibitoren sind mit Ausnahme von MFP entweder Kalziumnitrit oder Amino-Alkohole. Eine Übersicht über die gegenwärtig gängigsten Produkte gibt **Tabelle 3.1**.

Tabelle 3.1 Marktübersicht über inhibitorhaltige Produkte

Firma	Produkte	Applikation	Basis	Vertretung
Cortec Corporation	MCI 2000	Zusatzmittel	Aminoalkohol	Corpac AG, Bischofszell
	MCI 2005	Zusatzmittel	Aminocarboxylat	
	MCI 2020	Oberfläche	Aminocarboxylat	
	MCI 2038, 2039	Mörtel		
Sto AG	?	Mörtel	Kooperation mit Cortec	Sto AG Schweiz, Niederglatt
Evonik (Degussa)	Protectosil CIT	Oberfläche	Silan	Schweizer Vertre- tung
	Protectosil DRY CIT	Zusatzmittel	Silan	
BASF	Emaco S88 CI	IS-Mörtel	vermutl. Aminoal- kohol	nur Nordamerika
	Shotpatch 20 MCI	IS-Mörtel		
BASF, MBT	Rheocrete 222+	Zusatzmittel	Aminoalkohol	nur Nordamerika
	Rheocrete CNI	Zusatzmittel	Calciumnitrit (30%)	
MFP SA	MFP	Oberfläche	MFP	Lizenznehmer in der Romandie
Sika AG	Ferrogard 901	Zusatzmittel	Aminoalkohol	Sika AG, Zürich
	(Ferrogard CNI)	Zusatzmittel	Calciumnitrit	
	Ferrogard 903	Oberfläche	Aminoalkohol	
	Fertigmörtel mit integriertem Inhibitor	Mörtel	nicht im Sortiment, Rezeptur wäre vorhanden	
Axim Italcementi Group	Catexol CN-CI	Zusatzmittel	Calciumnitrit	nur Nordamerika
	Axim Post III	Oberfläche	Diethylene imidoxi- de, Octyltriethoxysi- lane	

Tabelle 3.1 Marktübersicht über inhibitorhaltige Produkte

Firma	Produkte	Applikation	Basis	Vertretung
Technochem	MuCIS AD 18L/19L	Zusatzmittel	Vermutl. Aminoalkohol	CH: in Preverenges
	MuCIS MIA 100/200	Oberfläche Mörtel	Evtl. Kombination mit Silan? (aus Cortec-Produkten)	
	MuCIS BS 38/39			
Euclid Chemical Company	Armactect	Zusatzmittel	Calciumnitrit	nur Nordamerika
	Eucon CIA/BCN	Zusatzmittel	Calciumnitrit	
Grace Construction Products	DCI	Zusatzmittel	Calciumnitrit	CH: in Mont-sur-Lausanne, Baar
	DCI-S	Zusatzmittel	Calciumnitrit	
W.R. Meadows	Meadow-Crete H2	Mörtel	?	nur Nordamerika

Bei Altbauten kommt dem Transportweg des Inhibitors zur Bewehrung eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Um diesen zu verkürzen sowie um eine einfachere Handhabung zu erzielen, haben einzelne Hersteller Instandsetzungsmörtel mit integriertem Korrosionssinhibitor entwickelt (z.B. Cortec, Evonik und Technochem). Dabei handelt es sich um 1-komponentige Fertigmörtel oder um Zusatzmittel, die einem Fertigmörtel oder Frischbeton beigefügt werden. Diese Lösung könnte auch für Instandsetzungen mit Spritzbeton oder Vorbeton eingesetzt werden.

Recherchen der Forschungsstelle haben ergeben, dass nur sehr wenige der aufgelisteten Produkte mit integriertem Inhibitor im europäischen Markt zur Anwendung kommen. Schwerpunkt für solche Produkte ist der anglosprachige Wirtschaftsraum (v. a. USA, Kanada, Australien) und z.B. auch Arabien. Im europäischen Markt herrscht die Devise vor, dass das „Instandsetzungsprinzip Inhibitor“ generell ohne einen Betonersatz funktionieren und der Inhibitor nur auf der Bauteiloberfläche appliziert werden und über verschiedenen Transportmechanismen durch den Beton zur Stahloberfläche gelangen sollte. Aus diesem Grund werden Produkte, die gemäss Nachforschungen der Forschungsstellen inhibitorhaltig sind, nicht als „besonders korrosionsinhibierend“, sondern nur als normale Instandsetzungsmörtel angeboten.

Ein Hauptanbieter für Mörtel mit integriertem Inhibitor ist die Firma Cortec Corporation/USA, die über diverse Inhibitor-Produkte auf Basis von Amino-Alkoholen verfügt. Unter anderem wird von Cortec mit MCI 2020 auch ein Inhibitor angeboten, der auf der Oberfläche eines Bauteils appliziert wird. In Pressemitteilungen wurde 2003 bekannt, dass Cortec zusammen mit dem Hersteller STO AG inhibitorhaltige Fertigmörtel auf den Markt brachte.

Im Gegensatz zur Sika Schweiz bietet Sika Australien ebenso solche Produkte an. Bei der Sika Schweiz liegt der Schwerpunkt dagegen auf dem Inhibitor Sika FerroGard-901 (Zusatzmittel) und dem Sika FerroGard-903, der auf der Bauteiloberfläche appliziert wird und durch die beschriebenen Transportmechanismen bis zur Bewehrung vordringen muss.

In eine andere Richtung ging Evonik mit dem Protectosil CIT, das auf die Betonoberfläche aufgebracht in den Beton ein- und zur Bewehrung vordringen soll [Standke 2002]. Gemäss Herstellerangaben hat dieses Produkt auf Grund der chemischen Struktur eine mehrfache Wirkung:

- Adsorption auf der Stahloberfläche und damit Schutz vor Korrosion
- Hydrophobierung des Betons und damit Reduktion des (weiteren) Wasser- und Chlordintrages

Eine Weiterentwicklung von Protectosil CIT ist das Protectosil DRY CIT, welches als pulverförmiges Zusatzmittel dem Mörtel/Beton beigegeben wird und sowohl inhibierende

Wirkung haben und zu einer erheblichen Reduktion der Wasseraufnahme des erhärteten Mörtels/Betons führen soll.

Auf dem gleichen Prinzip basiert das Produktlabel MuCIS (Multiple Corrosion Inhibiting Synergies) von Technocem. In den Firmenunterlagen heisst es: Während Korrosionsinhibitoren, die auf der Oberfläche von korrodierenden Stahlbetonbauteilen appliziert wurden, nur wenig Wirkung erzielten, kann das MuCIS-System vorteilhafte Synergien ausnutzen, um Korrosion wirkungsvoll zu verhindern. Dabei werden die bekannten korrosionsinhibierenden Wirkstoffe mit Komponenten versehen, welche den Wasserhaushalt im Beton stabilisieren sollen. Damit wird genau wie beim Protectosil CIT vom der rein anodischen Kontrolle (Prinzip 11 nach der Norm SN EN 1504-9 [CEN 2006] abgewichen und ausserdem eine Erhöhung des elektrischen Betonwiderstands bewirkt (Prinzip 8 nach der Norm SN EN 1504-9 [CEN 2006]. Die MuCIS-Produkte werden als fertig gemischte Reparaturmörtel oder als Zusatzmittel angeboten. Bei der Instandsetzung der Brenner Autobahn von 1999 bis 2002 kam gemäss Firmenangaben z. B. der Mörtel MuCIS BS 40 M6 / FR zum Einsatz].

Auch die Firma Cortec Corporation/USA bietet mit dem MCI 2018 ein inhibitorhaltiges Imprägniermittel an, das diese Synergie nutzt. Einen Überblick über die historische Entwicklung ist in [Miksic 2009] gegeben. Darin sind auch einige Fallbeispiele vorgestellt.

Schon seit längerer Zeit tauchen inhibitorhaltige Haftschlämmen in der Produktpalette zahlreicher Hersteller auf, die in der Regel als kombinierte Haftbrücke und Korrosionsschutzanstrich für die Instandsetzung von korrodierenden Bewehrungsstäben zum Einsatz kommen (z. B. SikaTop-Armatec 110 EpoCem, EMACO NanoCrete AP und viele weitere). Diese Produkte werden direkt auf den vorher freizulegenden korrodierenden Stahlstab appliziert (Prinzip C nach [DAfStb 2001] bzw. Prinzip 11.1 nach [EN 1504-9]). Dieses „Prinzip“ der Inhibitoranwendung, bei dem der Inhibitor direkt auf die betroffene Stahloberfläche appliziert werden kann, ist seit Jahren Stand der Technik und wegen des fehlenden Transportweges nicht mit den in diesem Projekt zu untersuchenden Vorgängen vergleichbar und wird nicht weiter vertieft.

3.3 Neue Untersuchungen zum kurativen Einsatz von Inhibitoren (eher negativ)

Im Rahmen des Strategic Highway Research Program (SHRP, 1987-1993) wurden verschiedene Feldversuche an Brücken durchgeführt. Dabei wurden anorganische und organische Inhibitoren (MCI 2000 und MCI 2020) auf die Oberflächen aufgebracht. In einer anschliessenden fünfjährigen Studie (1994-1999) wurde die Wirkung weiterverfolgt. In keinem Falle konnte eine inhibierende Wirkung nachgewiesen werden [FHWA 2002].

In einer mehrjährigen amerikanischen Studie [VDOT 2003b], an der sich mehrere Staaten beteiligten und die vom Virginia Department of Transportation geleitet wurde, wurden 1996 verschiedene Laborkörper hergestellt und Testflächen an Brücken eingerichtet und diese über 5 Jahre verfolgt. Im Folgenden werden einige ausgewählte Resultate der Untersuchungen, vorab jene mit oberflächlich aufgetragenen Inhibitoren, zusammengefasst.

Die eingesetzten Prüfkörper (ca. 56 x 46 x 20 cm) bestanden im unteren Teil aus chloridfreiem Beton mit einer für Brücken des VDOT üblichen Zusammensetzung. Der obere Teil wurde mit dem gleichen Beton, aber mit einem Chloridgehalt von etwa 0.5 bis 2.4 M.%/Bindemittelmasse hergestellt (Chloridzugabe zum Anmachwasser).

Bei der einen Serie von Probekörpern wurde keine lokale Instandsetzung durchgeführt, sondern nur eine Mörtel- bzw. Betonschicht aufgebracht (**Bild 3.3, oben**). Bei einer anderen Serie wurde ein Ausschnitt der Probekörper (ca. 30 x 30 cm) nur lokal instand gesetzt (**Bild 3.3, Mitte**). Bei einer dritten Serie wurden die Probekörper lokal instand gesetzt und erhielten zusätzlich noch ein Überzug (**Bild 3.3, unten**).

Die Gesamthöhe der Probekörper blieb bei allen Vorgehensweisen unverändert (ca. 20 cm). Die Überdeckung der eingelegten Bewehrungsstäbe betrug immer ca. 38 mm. Für die Instandsetzung und für den Betonaufrag wurde Beton mit Portlandzement, Portlandzement und Silikastaub sowie Portlandzement und Flugasche verwendet. Teilweise wurden den Mischungen Inhibitoren als Zusatzmittel beigegeben. Bei einem Teil der Probekörper wurden vor der Instandsetzung bzw. vor dem Aufbringen des Betonaufrags noch Inhibitoren (Postrite bzw. Nitrit-Lösung, FerroGard-903) auf die Oberflächen aufgebracht.

An den Probekörpern wurden während der Aussenlagerung verschiedene korrosionstechnische Messgrößen über etwa 4 Jahre periodisch erfasst (Korrosionspotenzial, Korrosionsgeschwindigkeit mittels Polarisationswiderstand, elektrischer Widerstand, Spannungsdifferenz und Makroelementströme zwischen der oberen und unteren Bewehrung). Das **Bild 3.4** zeigt einen Teil der Resultate. Zunächst kann festgestellt werden, dass erwartungsgemäss mit zunehmendem Chloridgehalt die Korrosionspotenziale negativer und die Korrosionsgeschwindigkeiten grösser werden. Am Ende des Versuchs wurden die Stahlstäbe ausgebaut. Dabei wiesen nur die Stahlstäbe in den Probekörpern mit dem höchsten Chloridgehalt erhebliche Korrosionsangriffe auf. Bei den andern gab es keinen oder nur einen schwachen Korrosionsangriff. Generell zeigte der Stab B, der bis auf die Randzone im neuen Beton eingebettet ist, einen geringeren Angriff als der Stab D, der im chloridverseuchten Altbeton lag. Die Resultate der visuellen Beurteilung stimmen demnach besser mit den gemessenen Korrosionspotenzialen als mit den Korrosionsgeschwindigkeiten überein.

Die Probekörper mit dem höchsten Chloridgehalt wiesen Risse, Ablösungen und Verbundverluste zwischen aufgebrachtem Betonaufrag und Untergrund (= chloridhaltige obere Hälfte der Probekörper) auf. Bei den übrigen Probekörpern war die Haftzugfestigkeit mehrheitlich in Ordnung. Dies gilt auch für die Probekörper, bei denen Inhibitoren oberflächlich aufgebracht wurden.

Aus dem **Bild 3.4** geht weiter hervor, dass keine grundlegenden Unterschiede zwischen den Vorgehensweisen auftreten. Auch ist kein günstiger Einfluss der Inhibitoren erkennbar.

Ergänzend zu den Laborversuchen wurden Testflächen an 5 Brücken angelegt, wobei Inhibitoren als Zusatzmittel wie auch in oberflächlich aufgetragenen Lösungen eingesetzt wurden. Die Resultate dieser Untersuchungen waren aber widersprüchlich und liessen keine sicheren Folgerungen zu.

Daneben wurden weitere Probekörper mit unterschiedlichen Bindemitteln sowie ohne und mit verschiedenen Inhibitoren hergestellt, die periodisch mit einer Chloridlösung beaufschlagt wurden. Die Ergebnisse mit diesen Probekörpern werden hier nicht weiter betrachtet.

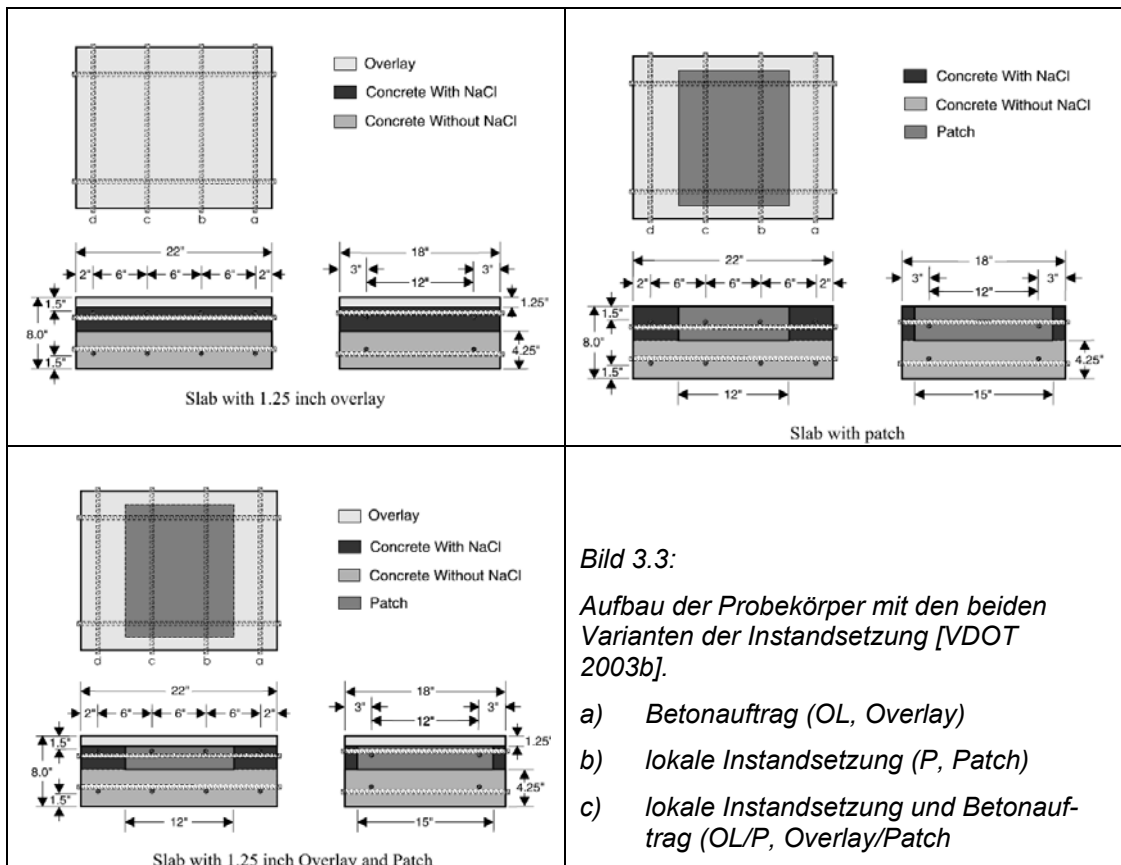


Bild 3.3:
 Aufbau der Probekörper mit den beiden Varianten der Instandsetzung [VDOT 2003b].

- a) *Betonauftrag (OL, Overlay)*
- b) *lokale Instandsetzung (P, Patch)*
- c) *lokale Instandsetzung und Betonauftrag (OL/P, Overlay/Patch)*

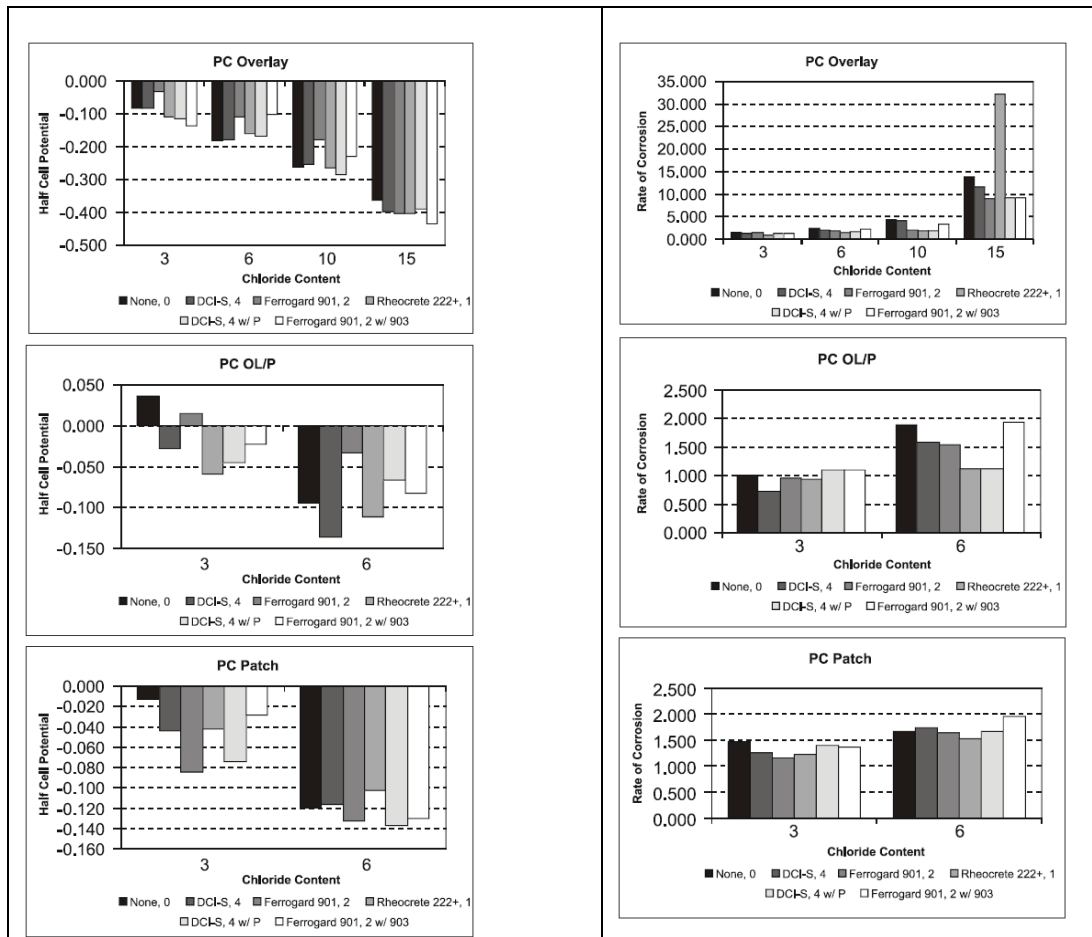


Bild 3.4 Einfluss des Chloridgehaltes (3, 6, 10 und 15 lb/yd³ Beton: ca. 0.47, 0.94, 1.57 und 2.36 M.%/Zement) und von Inhibitoren auf Korrosionspotenzial (links, in V_{CSE}) und Korrosionsgeschwindigkeit (rechts, in mil/year). 1 mils/year = 0.0254 mm/Jahr = 25.4 μ m/Jahr [VDOT 2003b].

Erläuterungen zu Bild 3.4.

PC Overlay: Probekörper mit Portlandzement; Betonauftrag

PC OL/P: Probekörper mit Portlandzement; lokaler Instandsetzung und Betonauftrag

PC Patch: Probekörper mit Portlandzement; nur lokaler Instandsetzung

Zugabe der Inhibitoren als Zusatzmittel:

- DCI-S: Derex Corrosion Inhibitor (Nitrite) mit Verzögerer von Grace
- Rheocrete 222+ (Aminoalkohol) von BASF
- FerroGard-901 und -903 von Sika (Aminoalkohol).

Oberflächlicher Auftrag:

- P (Postrite, Nitrite) von Grace
- FerroGard-903 (Aminoalkohol) von Sika.

In Laborversuchen prüften Ngala et al. [Ngala 2004] einen Inhibitor auf der Basis Äthanolamin. Die Probekörper enthielten unterschiedliche Chloridgehalte (Beigabe zum Anmachwasser) und wurden teilweise beschleunigt karbonatisiert. Nach einer mehrmonatigen Vordkonditionierung (Trocken-Nass-Zyklen) wurden die Oberflächen mit dem Inhibitor behandelt. Die Korrosion wurde danach über ca. 1 ½ Jahre verfolgt. Ein gewisser inhibierender Effekt wurde lediglich bei den nicht karbonatisierten Probekörpern mit geringen Chloridgehalten beobachtet.

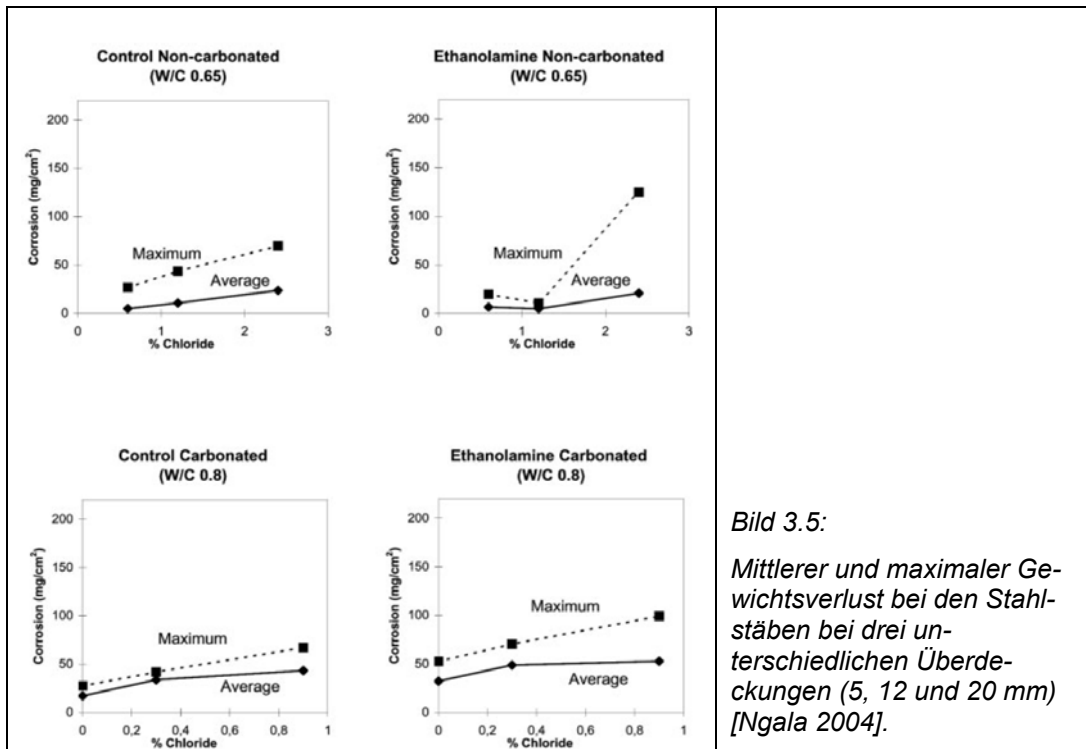


Bild 3.5:

Mittlerer und maximaler Gewichtsverlust bei den Stahlstäben bei drei unterschiedlichen Überdeckungen (5, 12 und 20 mm) [Ngala 2004].

In [Sharp 2004] werden Versuche mit chloridverseuchten (2.2 M.%/Z) Probekörpern beschrieben, die mit zwei oberflächlich aufgetragenen Inhibitoren (TPS-II, FerroGard-903) behandelt und im Freien gelagert wurden. Bei der anschließenden Potenzialmessung über fast 300 Tage konnte keine inhibierende Wirkung festgestellt werden (Überdeckung: 2 Inch bzw. etwa 51 mm). Der Eintrag der Inhibitoren mit Vakuum und Druck brachte keine erkennbare Verbesserung (Überdeckung: 1.5 Inch bzw. 38 mm). Im **Bild 3.6** sind die entsprechenden Potenzial-Zeit-Kurven gezeigt.

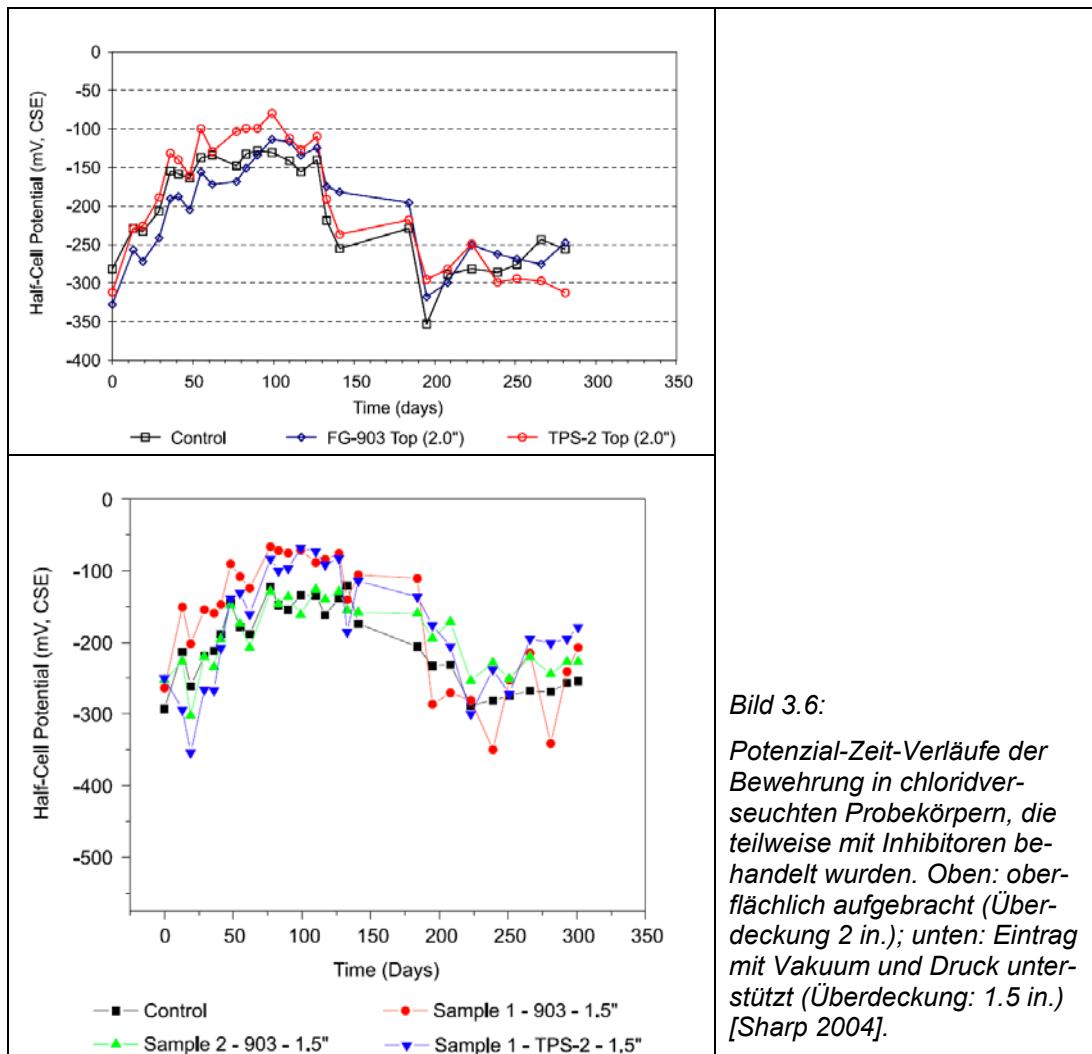


Bild 3.6:

Potenzial-Zeit-Verläufe der Bewehrung in chloridver-seuchten Probekörpern, die teilweise mit Inhibitoren be-handelt wurden. Oben: ober-flächlich aufgebracht (Über-deckung 2 in.); unten: Eintrag mit Vakuum und Druck unter-stützt (Überdeckung: 1.5 in.) [Sharp 2004].

Bei einem kleinen Feldversuch bei einer Einstellhalle mit oberflächlich applizierten Inhibi-toren (SikaFerrogard-903, MCI 2020) ergab sich keine signifikante Änderung der Korrosi-ongeschwindigkeit [Grantham 2005]. Anzumerken ist, dass dabei die Versuchszeit sehr kurz ($< \frac{1}{2}$ Jahr) und die Eindringtiefe der Inhibitoren wahrscheinlich zu gering waren.

Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms GROWTH (Teil des 1. Bereiches "For-schung, Entwicklung, Demonstration" aus dem 5. Forschungsprogramm der EU) soll die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie unter gleichzeitiger Betonung der Nachhaltigkeit verbessert werden. Dabei beschäftigte sich eines der Teilprojekte aus der Leitaktion 2 „Nachhaltige Mobilität und Zusammenwirken der Verkehrsträger“ mit dem Ti-tel SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure) auch mit dem Einsatz von Inhibitoren [Samaris 2003]. Das Budget des Projektes SAMARIS betrug rund 4.7 Mio. Euro.

Beim angesprochenen Teilprojekt handelte es sich um das Teilprojekt WP 13 „Corrosion Inhibitors“, das mit etwa 1 Mio. Franken gefördert wurde. Am Projekt waren die irische National University of Ireland, Dublin, das Slovenian National Building and Civil Enginee-ring Institute, Ljubljana, das britische Transport Research Laboratory, Crowthorne, und die Sika Ireland Ltd., Dublin, beteiligt. Die geplante Projektdauer betrug 3 Jahre.

Das Ziel des WP 13 war es, die Auswirkungen und die Wirksamkeit von Inhibitoren zu un-tersuchen sowie Vorgaben für deren Charakterisierung und Einsatz zu machen. Die Ar-beit wurde in die folgenden Unterprojekte gegliedert:

- Studium der grundlegenden Mechanismen mit Laboruntersuchungen in simulierten Porenlösungen
- Laboruntersuchungen zur Wirksamkeit von Inhibitoren in Abhängigkeit von der Chloridkonzentration
- Laboruntersuchungen zur Wirksamkeit von Inhibitoren in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Betons
- Laboruntersuchungen zur Wirkung von Inhibitoren auf die mechanischen Eigenschaften, insbesondere auf das Frost-Tau-Verhalten des Betons
- Feldversuche (Überwachung von zwei konventionell und mit Inhibitoren instand gesetzten Brücken) sowie Untersuchungen des Verhaltens von Laborproben im künstlichen Meerwasserklima hinsichtlich Korrosion
- Erarbeiten von Empfehlungen für den Einsatz von Inhibitoren.

Bei diesen Untersuchungen standen die Inhibitortypen MFP (Natrium-Monofluorophosphat) und das Sika FerroGard-903 (Aminoalkohol) im Vordergrund. Bei den Feldversuchen wurden im Wesentlichen die im Jahr 2001 abgeschlossenen Feldversuche der Forschungsstelle im Naxbergtunnel [Hunkeler 2001] wiederholt, allerdings nur mit dem Inhibitortyp der Sika.

Das SAMARIS-Projekt wurde am 31.03.2006 offiziell beendet. Die Schlussberichte zu den Versuchen mit den Korrosionsinhibitoren liegen vor [Samaris 2006a,b,c]. Die Ergebnisse wurden anlässlich eines Seminars am 16./17.2.2006 an der EPFL, Lausanne, vorgestellt.

In der Versuchreihe A [Samaris 2006a] wurde die Wirksamkeit eines Inhibitors auf Basis von Amino-Alkohol (Sika Ferrogard-903) durch Test mit simuliertem chloridhaltigem Betonporenwasser untersucht. Dabei wurde herausgefunden, dass der Inhibitor die Korrosion reduzieren konnte. Der wichtigste Parameter für die Wirksamkeit ist das Verhältnis Inhibitor-/Chloridgehalt im Porenwasser:

- Wenn der Stahl bereits korrodiert, ist ein hohes Verhältnis Inhibitor-/Chloridgehalt von 1:1 notwendig, um die Korrosion zu reduzieren. Ist die Korrosion bereits stark fortgeschritten, ist eine komplette Repassivierung durch den Inhibitor praktisch unmöglich.
- Wenn das notwendige Verhältnis Inhibitor-/Chloridgehalt nicht erreicht wird, wird die Absorptionsschicht lokal aufgelöst und lochfrassartige Korrosionsangriffe (lokal mit starkem Abtrag) werden ermöglicht.
- Wenn das Verhältnis Inhibitor-/Chloridgehalt nach erfolgter Repassivierung wieder reduziert wird, kann der Korrosionsprozess erneut ablaufen.

Daraus wurde gefolgert, dass die Langzeitkonzentration des Inhibitors an den Bewehrungsstäben der entscheidende Parameter für eine erfolgreiche Instandsetzung ist, da sie infolge von Auslaugung- und Ausdampfungsprozessen mit der Zeit abnehmen kann.

In der Versuchsreihe B [Samaris 2006a] wurde das Eindringverhalten des Inhibitors geprüft. Die Probekörper wurden aus 2 verschiedenen Betonrezepturen hergestellt. „Mischung D“ mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und $w/z = 0.63$ und „Mischung E“ mit 280 kg/m^3 Zement und $w/z = 0.65$. Damit sind beide Beton für die Anforderungen an schweizerische Tiefbaubetone als eher „weniger dicht“ zu bezeichnen (Gas-Permeabilität zwischen $2.2 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ und $8.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$).

Untersucht wurde anschliessend u. a. das Eindringverhalten des Inhibitors bei einer Applikation von 500 g/m^2 . Die Wirkstoffmenge wurde in verschiedenen Tiefenstufen überprüft, wie beispielhaft für Mischung D in **Bild 3.7** dargestellt wurde.

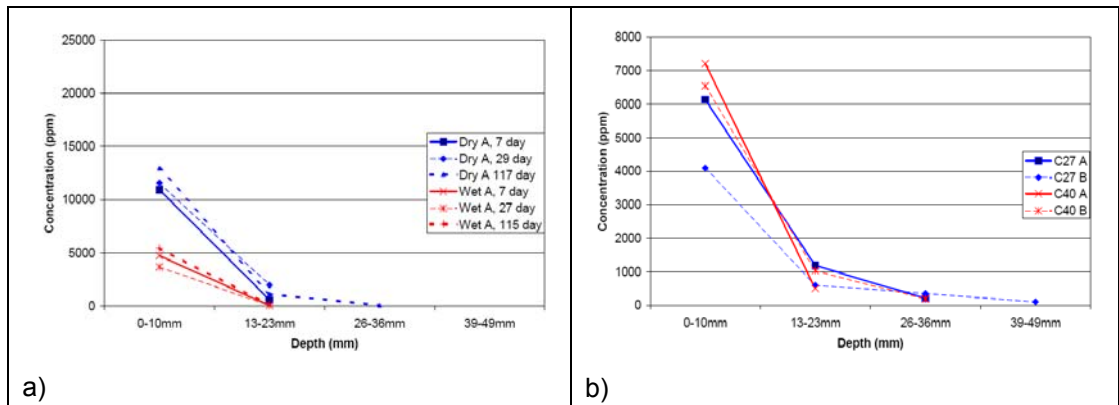


Bild 3.7: a) Eindringverhalten Inhibitor in Mischung D, b) Eindringverhalten nach 8 Monaten [Samaris 2006a].

Berichtet wurde, dass, abgesehen von einer Ausnahme, die Konzentration in der 2. Tiefenstufe (13-23 mm) nie grösser als 10 % der Konzentration der 1. Tiefenstufe war. Auch die Resultate der Untersuchungen nach 8 Monaten zeigen denselben Trend.

Die Resultate zeigen, dass die Konzentration des Inhibitors in den oberen Betonschichten schnell abgenommen hat (auswaschen, verdampfen). Ob eine ausreichende Wirkstoffmenge in die übliche Tiefenlagen von Bewehrungsstäben gelangen kann, konnte nicht ausreichend untersucht werden, wird aber im Projektbericht hinterfragt und als weiterer Forschungsbedarf ausgewiesen.

Calcium-Nitrit wurde bis anhin nur in wenigen Fällen für die kurative Anwendung geprüft [Ngala 2002, Søylev 2008]. Eine korrosionshemmende Wirkung konnte aber weder bei karbonatisiertem und chloridhaltigen Beton noch bei nicht karbonatisiertem Beton mit wenig erhöhtem Chloridgehalt nachgewiesen werden.

3.4 Neue Untersuchungen zum kurativen Einsatz von Inhibitoren (eher positiv)

Bei den Untersuchungen von [Mulheron 2000] wurden Probekörper zunächst zyklisch mit einer 5 %-igen NaCl-Lösung beaufschlagt, so dass die meisten eingelegten Bewehrungsstäbe zu korrodieren begannen (Überdeckung: 10, 25 und 40 mm). Es wurden Betone mit einem CEM I und w/z-Werten von 0.30, 0.45 und 0.60 verwendet. Nach 60 Zyklen (ca. 240 Tagen) wurden die Stahlstäbe zusätzlich anodisch belastet, so dass alle Stäbe Korrosion zeigten. Danach erfolgte die oberflächliche Applikation des Inhibitors (Sika-Ferrogard-903) gemäss den Angaben des Lieferanten (500 g/m²). Der aus dieser Belastung resultierende Chloridgehalt im Beton auf Höhe der Bewehrung wurde nicht angegeben. Aus den Resultaten in **Bild 3.8** geht hervor, dass in allen Fällen die Korrosionsgeschwindigkeit nach 50 Tagen stark abgenommen hat (Höhe entspricht passivem Stahl). Das Potenzial stieg zwar ebenfalls deutlich an, blieb aber bei Werten zwischen -300 und -400 mV stehen. Möglicherweise ist dies eine Frage der Versuchsführung.

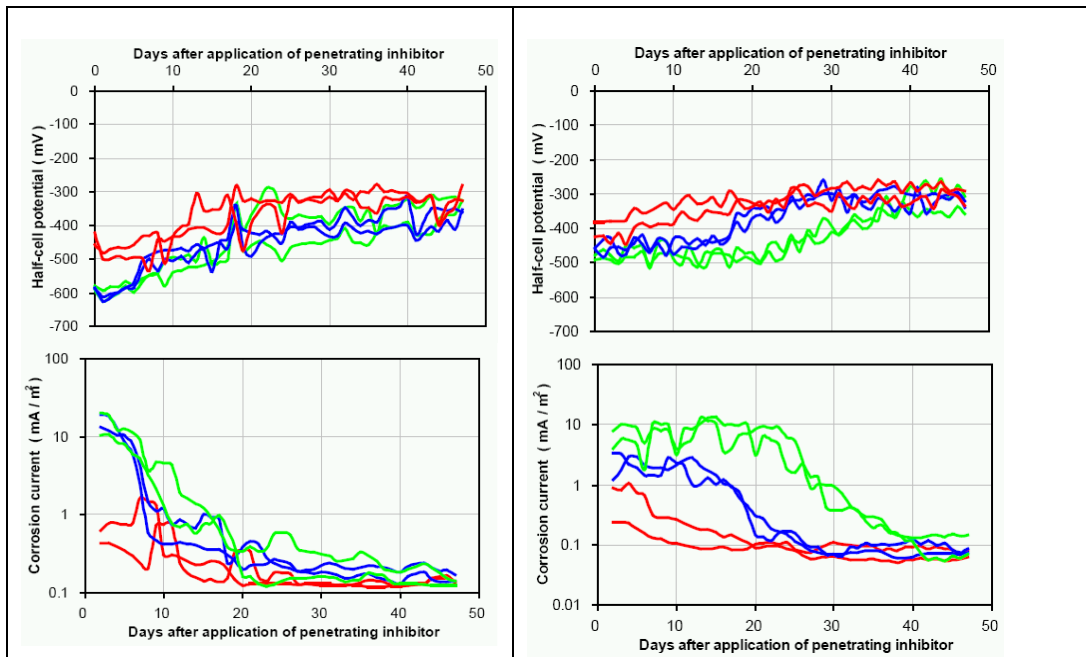


Bild 3.8 Zeitlicher Verlauf des Potentials und der Stromdichte nach der Applikation des Inhibitors Sika-Ferrogard-903 [Mulheron 2000].

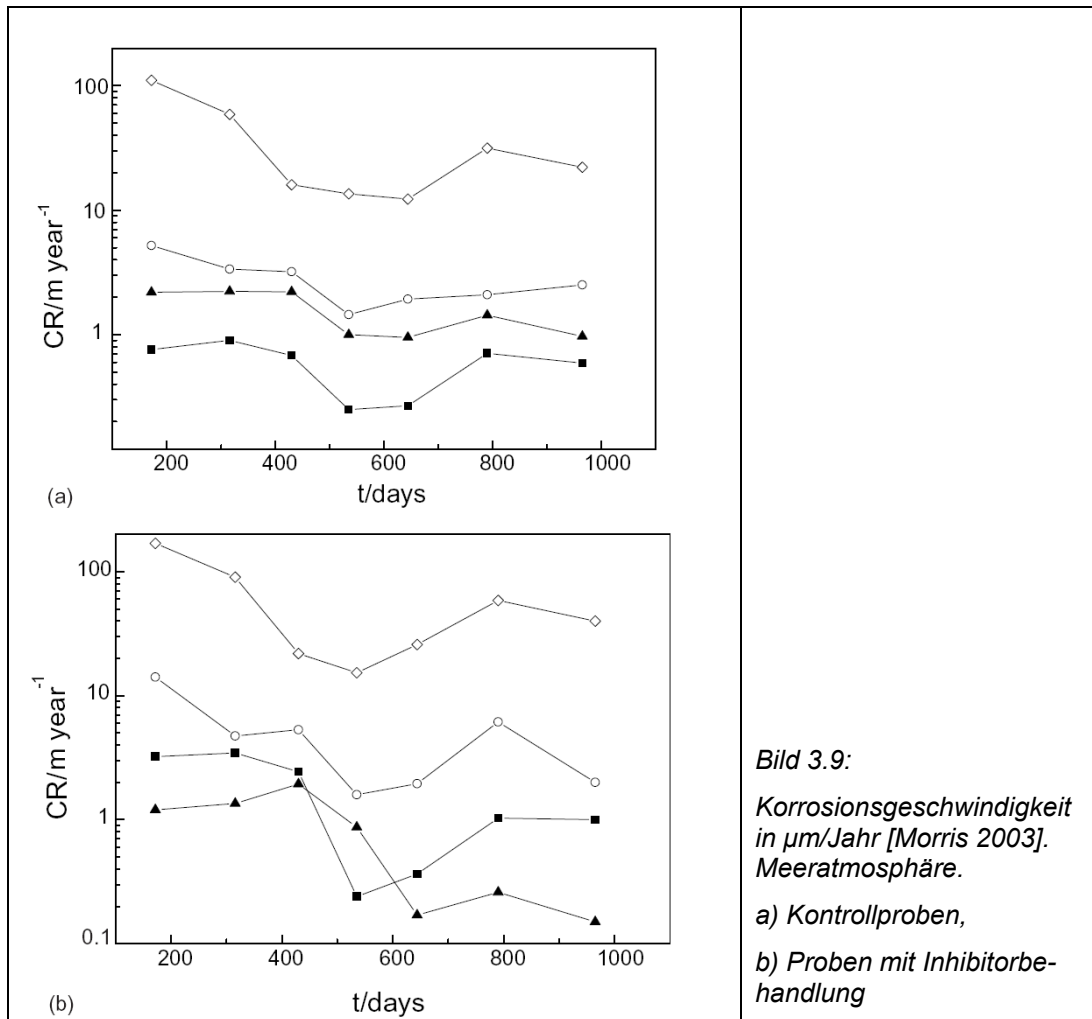
Links: „Schlechter“ Beton mit dem w/z-Wert von 0.60 (Zement CEM I, 300 kg/m³)

Rechts: „Guter“ Beton mit dem w/z-Wert von 0.30 (Zement CEM I, 450 kg/m³).

Rote Linien: Überdeckung 10 mm, blau: 25 mm, grün: 40 mm.

In [Standke 2002] wird Protectosil CIT (Corrosion Inhibitor Treatment) beschrieben und erläutert. Dabei handelt es sich um einen Korrosionsinhibitor auf der Basis organofunktionaler Alkoxysilansysteme von Degussa. Anhand von Strommessungen wird gezeigt, dass das Produkt wirkt. Es wird erläutert, dass das Produkt sowohl mit dem Beton wie auch mit dem Stahl reagiert und wegen der kleinen Molekülgröße in den Beton einzudringen vermag. Neben der inhibierenden Wirkung wird auch die hydrophobierende Wirkung des oberflächlich applizierten Systems hervorgehoben.

Die oberflächliche Anwendung eines MCI (Alkylaminoalkohol) bei chloridverseuchten (Zugabe zum Anmachwasser) und anschliessend in chloridhaltigem Wasser und in der Meeratmosphäre ausgelagerten Probekörpern zeigten gemäss [Morris 2002, 2003] nur bei geringen anfänglichen Chloridgehalten eine inhibierende Wirkung (Gehalte <0.43 M.%/Z). Eine Verdoppelung der Auftragsmenge verbesserte die Wirkung. Bei Proben, die in chloridhaltigem Wasser ausgelagert wurden und daher bei Versuchsende viele höhere Chloridgehalte aufwiesen, zeigte sich keine inhibierende Wirkung.



In einer anderen Arbeit [Bavarian 2003, 2007] wurde vorgerosteter Stahl einbetoniert. Die Oberfläche der Probekörper wurde danach mit den Inhibitoren MCI 2021 und 2022 von Cortec behandelt und in einer 3.5 %-igen NaCl-Lösung ca. 400 Tage ausgelagert. Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass die Inhibitoren a) auf dem Stahl angelagert wurden (Überdeckung ca. 25 mm) und b) der Korrosionsbeginn stark verzögern konnten. Die Wirkung war beim weniger dichten Beton stärker.

Holloway et al. [Holloway 2004] verglichen die Wirkung verschiedener Applikationsverfahren bei chloridverseuchtem Beton (Chloridbeigabe zum Anmachwasser, w/z 0.60, Überdeckung der Stäbe: ca. 30 mm). Neben der Zugabe des Inhibitors MCI 2005 zur Mischung (admixed) untersuchten sie auch dessen oberflächliche Anwendung ohne und mit Anwendung eines elektrischen Feldes (surface applied, electro migrated). Die oberflächliche Behandlung wurde während der ersten 300 Tage alle drei Wochen wiederholt. Dies führte zu gleich hohen Inhibitorgehalten in der Randzone wie das Anlegen eines elektrischen Feldes (**Bild 3.10**). Diese Werte liegen auf Bewehrungshöhe über dem der Mischung zudosierten Gehalt (admixed). Alle Probekörper wurden während der ersten 300 Tage zudem von unten weiterem Chlorideintrag ausgesetzt (Aufsaugen von chloridhaltigem Wasser). Nach dieser Vorbehandlung der Probekörper wurde die Korrosion mit elektrochemischen Messungen über 5 Jahre weiterverfolgt.

Die visuelle Begutachtung der Stahlstäbe am Ende der Untersuchung ergab, dass die Referenzprobe einen starken Korrosionsangriff mit Lochfrass zeigte (**Bild 3.11**). Die Oberseiten der Stäbe der inhibitorhaltigen Proben wiesen demgegenüber deutlich weniger Korrosion auf. Die Unterseiten der Proben zeigten generell einen stärkeren Korrosionsangriff als die Oberseiten. Das visuelle Ergebnis wurde durch die gemessenen Polarisationswiderstände (Mass für die Korrosionsgeschwindigkeit) bestätigt. Die daraus berechnete Inhibitorwirksamkeit lag nach 4 Jahren zwischen 50 und über 80%.

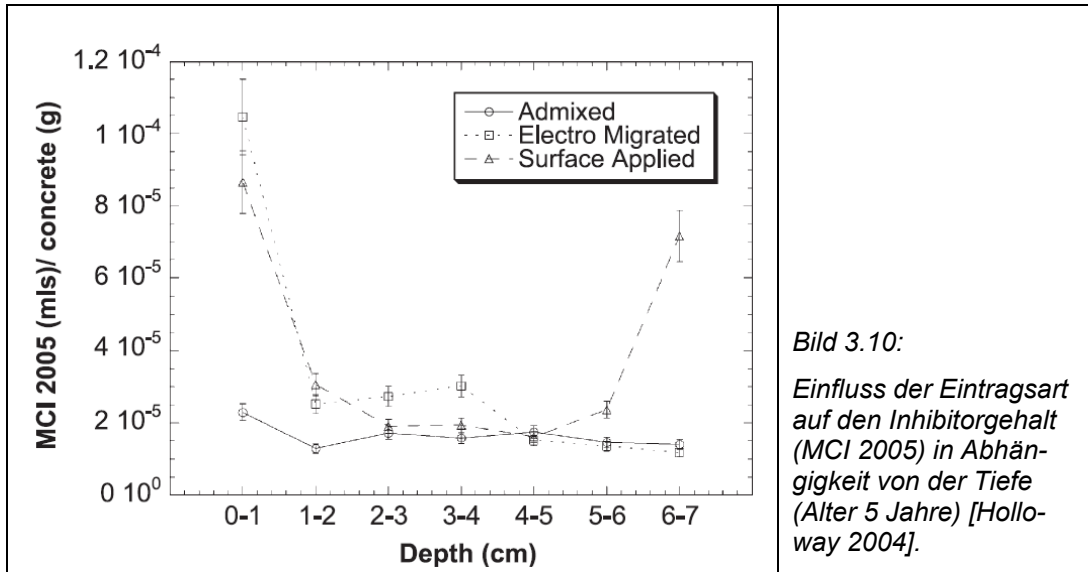


Bild 3.10: Einfluss der Eintragsart auf den Inhibitorgehalt (MCI 2005) in Abhängigkeit von der Tiefe (Alter 5 Jahre) [Holloway 2004].

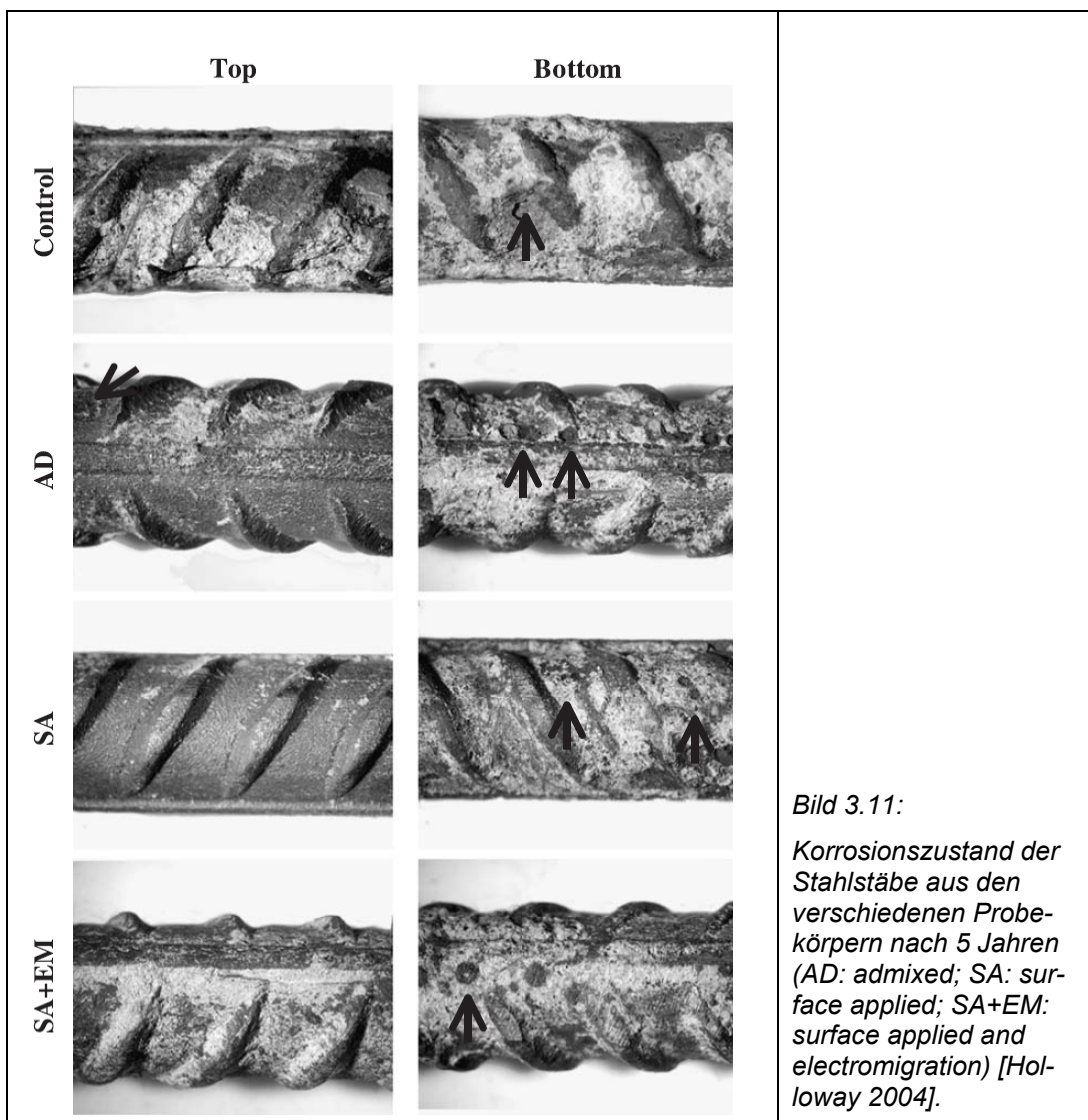


Bild 3.11: Korrosionszustand der Stahlstäbe aus den verschiedenen Probekörpern nach 5 Jahren (AD: admixed; SA: surface applied; SA+EM: surface applied and electromigration) [Holloway 2004].

In der Arbeit von [Richardson 2006] wurde die Wirkung der oberflächlichen Applikation eines organischen Inhibitors (Alkanolamin) auf die bereits laufende Korrosion untersucht. Der Chloridgehalt im Beton wurde mit einer unterschiedlichen Anzahl Belastungszyklen

mit chloridhaltigem Wasser variiert. Der Inhibitor war bei den Chloridgehalten von 1.5 bis 2.4 M.-%/Z auf Bewehrungshöhe (Überdeckung 18 mm) nicht in der Lage die laufende Korrosion zu stoppen, wohl aber teilweise deutlich zu reduzieren. Die Reduktion wurde vom Chlorid- und Inhibitorgehalt sowie von der Betonzusammensetzung beeinflusst.

Das Prüfverfahren gemäss ASTM G-109 [ASTM 2005] wurde von [Bennett 2005] benutzt, um die Wirkung von oberflächlich aufgetragenen Inhibitoren zu prüfen. Der Auftrag erfolgte sobald festgestellt wurde, dass die eingebauten Bewehrungsstäbe zu korrodieren begannen. In Abweichung zum ASTM-Prüfverfahren, wurden die Probekörper mehrmals im Ofen getrocknet (70°C, 2 Wochen), um den Chlorideintrag zu beschleunigen. Die drei untersuchten Inhibitoren zeigten keine Wirkung. Im Nachgang dazu wurde die Arbeit mit der oberflächlichen Applikation von Protectosil CIT fortgesetzt. Bei den drei behandelten Probekörpern wurde das Korrosionspotenzial positiver. Parallel dazu sanken die Korrosionsströme unter den Grenzwert der Norm ab.

Zu den in [Bennett 2005] beschriebenen Tests ist anzumerken, dass nicht differenziert werden kann, ob die korrosionsvermindernde Wirkung auf die inhibierende oder auf die hydrophobierende Komponente des Protectosil CIT zurückzuführen ist.

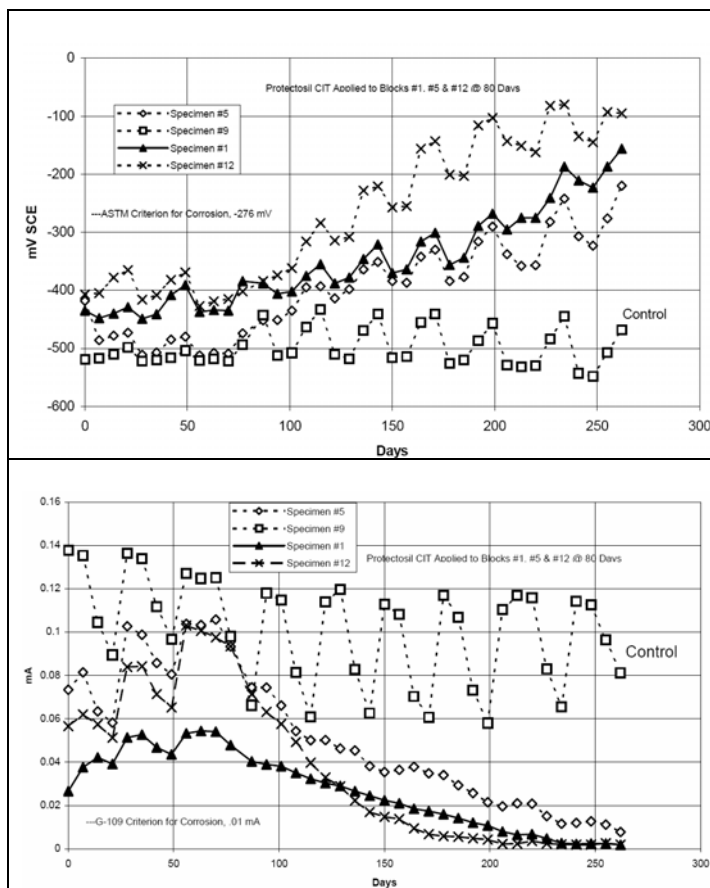


Bild 3.12:

Resultate der Untersuchungen mit der nachträglichen Anwendung von CIT bei bereits korrodierender Bewehrung [Bennett 2005]:

Probe Nr. 9: keine Behandlung (gerissen)

Probe Nr. 5: keine Behandlung in der 1. Studie (gerissen), danach mit CIT behandelt

Probe Nr. 1: in der 1. Studie mit Inhibitor C behandelt, danach zusätzlich mit CIT

Probe Nr. 12: in der 1. Studie mit Inhibitor F behandelt, danach zusätzlich mit CIT [Bennett 2005].

In einer Studie des britischen Building Research Establishment [Morlidge 2005] wurde die präventive Wirkung von FerroGard-903 (Auftrag: 1 kg/m², nach dem 3. Zyklus) an einem Beton mit einem w/z-Wert von 0.65 bis 0.69 untersucht. Die zyklische Belastung mit einer 1%-igen NaCl-Lösung führte bei den nicht behandelten Referenzproben nach ca. 36 Zyklen (250 Tage) zu einem starken Potenzialabfall bzw. zu einer starken Zunahme der Korrosionsgeschwindigkeit. Demgegenüber blieben die behandelten Proben auch nach 137 Zyklen (ca. 960 Tage) praktisch vollständig ohne Korrosion, wie aus **Bild 3.13** hervorgeht. Der mittlere Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe (25 mm) betrug bei Versuchsende etwa 4 bis 5 M.-%/Z. Zwischen den unbehandelten und behandelten Probekörper gab es diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede.

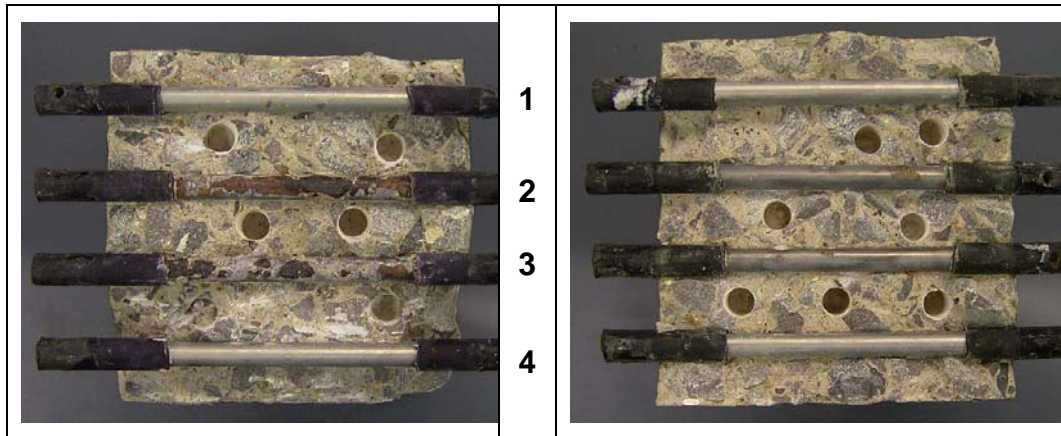


Bild 3.13 Zustand der Stäbe aus unlegiertem (Nr. 2 und 3) und der nichtrostenden Stahl (Nr. 1 und 4,) bei Versuchsende bei der unbehandelten Referenzprobe (links) und bei einem mit FerroGard 903 behandelten Probekörper (rechts) [Morlidge 2005].

In einer sehr umfangreichen Arbeit [Stanish 2006] wurde die Wirkung von einem kommerziell erhältlichen organischen Inhibitor auf chloridverseuchte Probekörper, die mit verschiedenen Betonzusammensetzungen (w/z-Wert, Zementart) hergestellt wurden, untersucht. Es zeigte sich, dass der Inhibitor die Korrosion dann zu stoppen vermochte, wenn die Korrosionsgeschwindigkeit nicht allzu hoch war bzw. der Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe (hier 15 mm) unter einem, von der Zementart abhängigen, Grenzwert lag (**Bild 3.14**). Wobei hier der Grenzwert von Proben gemeint ist, die vor der ersten Chloridbelastung mit dem Inhibitor behandelt wurden. Auf Grund der eigenen Erfahrung sind die in diesem Bild gezeigten Grenzwerte (Wahrscheinlichkeit) jenen von unbehandeltem Beton sehr ähnlich.

Generell kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass ab einem gewissen Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe der Inhibitor keine korrosionshemmende Wirkung mehr hat.

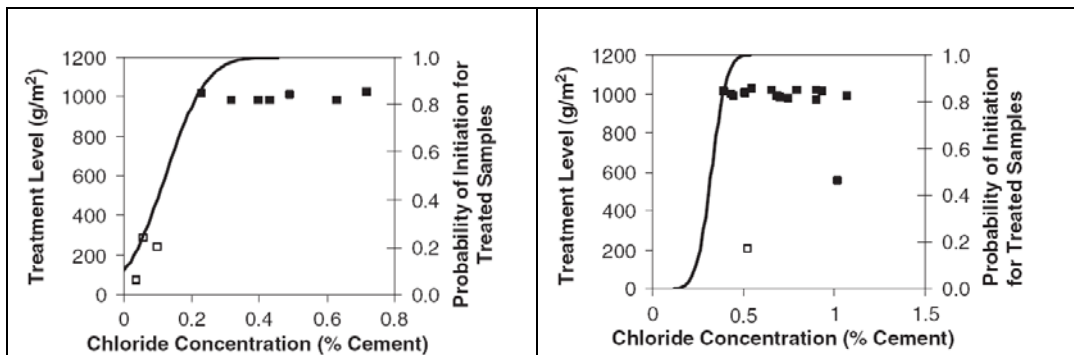


Bild 3.14 Wahrscheinlichkeit für Korrosion in Abhängigkeit vom Chloridgehalt der Proben (oben: Beton mit w/z von 0.40 und Flugasche; unter: Beton mit w/z von 0.40 und CEM I), die vor der Chloridbelastung behandelt wurden (durchgezogene Linie, rechte Skala) und Wirkung der oberflächlich aufgetragene Inhibitormenge auf die Korrosion in Abhängigkeit vom Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe (15 mm) [Stanish 2006].

offene Symbole: Korrosion konnte gestoppt werden

volle Symbole: Korrosion konnte nicht gestoppt werden

Die oberflächliche Anwendung eines MCI an karbonatisierten Probekörpern (**Bild 3.15**) wie auch in einem kleinen Feldversuche ergab eine korrosionshemmende Wirkung [Heiyantuduwa 2005, 2006]. In einer Arbeit der Sika [Maeder 2005] wurde gezeigt, dass oberflächlich applizierte organische MCI (SikaFerrogard-903) auch durch karbonatisierten Beton eindringen kann.

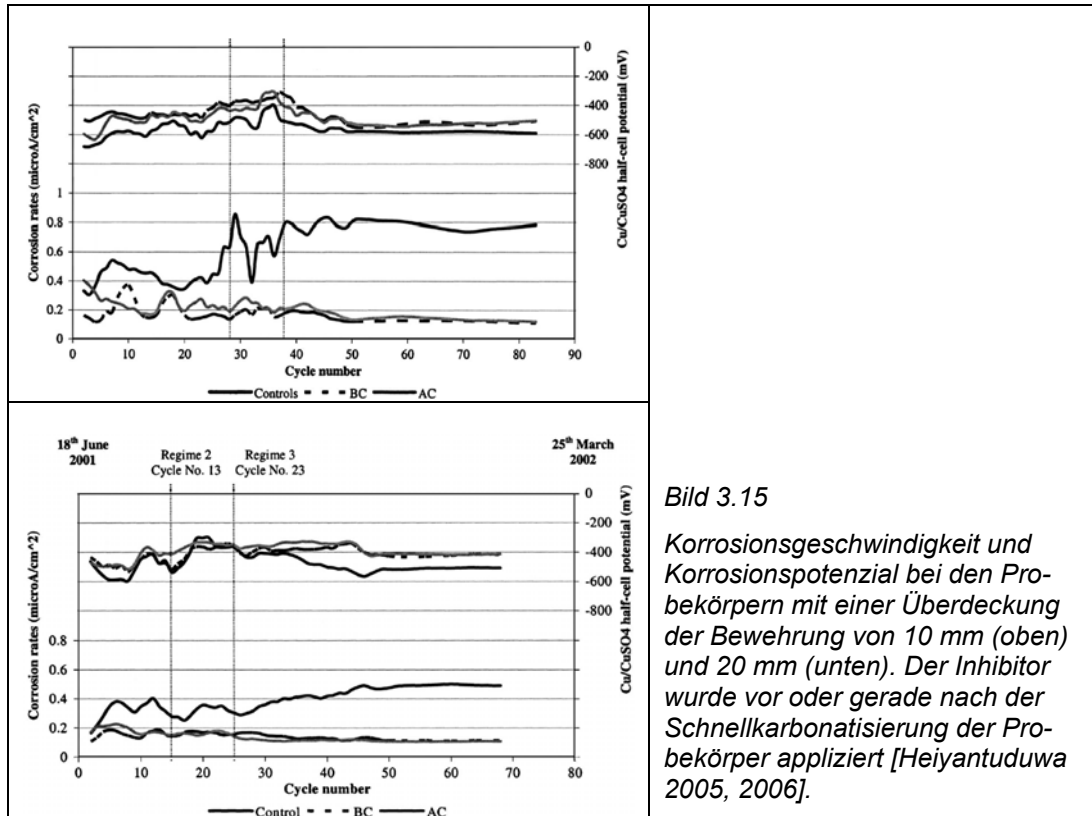


Bild 3.15

Korrosionsgeschwindigkeit und Korrosionspotenzial bei den Probekörpern mit einer Überdeckung der Bewehrung von 10 mm (oben) und 20 mm (unten). Der Inhibitor wurde vor oder gerade nach der Schnellkarbonatisierung der Probekörper appliziert [Heiyantuduwa 2005, 2006].

In [Cusson 2006] werden die Resultate von Feldversuchen erläutert, die mit 5 Instandsetzungssystemen an der Leitmauer einer 24-jährigen Brücke in Kanada durchgeführt wurden. Die Leitmauer zeigte wegen des Chlorideintrags die üblichen Korrosionsprobleme. Bei den Versuchen wurde für die Probeinstandsetzungen der geschädigte Beton in den Reparaturstellen abgetragen und mit den verschiedenen Systemen reprofiliert (zur Abtragtiefe fehlen genaue Angaben). Drei der sechs geprüften Systeme enthielten Inhibitoren im Instandsetzungsmörtel, bei zwei Massnahmen wurde zusätzlich noch ein Inhibitor auf der Oberfläche appliziert. Die 3-jährigen Messungen zeigten, dass die Reparaturstellen, je nach System, mehr oder weniger stark austrockneten (parallel dazu stieg der elektrische Betonwiderstand). Die Korrosionspotenziale in den Reparaturstellen wurden entsprechend mehrheitlich positiver. Im Gegensatz dazu wurden die Werte im nicht instand gesetzten Beton stetig negativer. Aus den Resultaten wurde geschlossen, dass die Instandsetzung mit konventionellem Beton ungenügend ist und die inhibitorhaltigen Systeme wie auch der SCC-Beton eine gute Wirkung hatten. Sie folgerten aus den Ergebnissen zudem, dass zwischen den Reparaturstellen und den nicht instand gesetzten Bereichen die Gefahr der Bildung von Makroelementen besteht.

In einer Untersuchung von Bolzoni et al. [Bolzoni 2001, 2007] wurden zwei kommerziell erhältliche MCI (Amine/FM, Alkanolamine/DM) untersucht. Diese wurden in verschiedenen Testserien oberflächlich appliziert. Die Ergebnisse ergeben kein einheitliches Bild (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2 Ergebnisse der Untersuchungen von [Bolzoni 2001, 2007].

Testserie	Ergebnis
<u>Testserie 1:</u> Chloridzugabe zum Anmachwasser, 0.8 und 1.2 M.%/Z. Applikation nach 8 und 12 Monaten.	<u>Kein erkennbarer Einfluss</u> auf Potenzial und Korrosionsgeschwindigkeit bei den Proben mit einem Chloridgehalt von 1.2 M.% (0.8 M.% keine Applikation). Kein Nachweis der Eindringtiefe des Inhibitors (Überdeckung der Bewehrung 20 mm). Vermutung: Inhibitor hat Bewehrung nicht erreicht.
<u>Testserie 2:</u> Zyklische Belastung der Proben mit chloridhaltigem Wasser. Applikation nach 3 und 7 Monaten	<u>Kein erkennbarer Einfluss</u> auf Potenzial und Korrosionsgeschwindigkeit. Chloridgehalt bei der 2. Applikation leicht unter 2 M.%/Z. Vermutung: Inhibitor hat Bewehrung nicht erreicht.
<u>Testserie 3:</u> Schnellkarbonatisierung der Proben über 6 Monate (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchtigkeit, 95 % CO ₂). Danach Aussenlagerung und Applikation nach 8 und 12 Monaten, d.h. 2 und 6 Monate nach der Schnellkarbonatisierung.	Wirkung: Das Korrosionspotenzial wurde beim Beginn der Aussenlagerung deutlich negativer. Nach der Applikation des Inhibitors nahm die <u>Korrosionsgeschwindigkeit bis maximal auf etwa 50 %</u> ab, lag aber immer noch deutlich über den Werten für passiven Stahl im alkalischen Milieu. Vermutung: Inhibitor hat Bewehrung nicht erreicht und die festgestellte Wirkung könnte durch Änderungen des Betonwiderstands bedingt sein.
<u>Testserie 4:</u> wie Serie 2, Beton mit tieferem w/z-Wert, Applikation bevor Korrosion initiiert wurde (nach 7 und 12 Monaten).	Wirkung: Nach 650 Tagen (27 Zyklen) lag der Chloridgehalt bei etwa 0.7 – 1.4 M.%/Z. Das <u>Korrosionspotenzial der meisten unbehandelten Proben</u> wie auch einiger behandelter Proben wurde mit der Zeit deutlich negativer. Die Korrosionsgeschwindigkeit blieb aber bei allen Proben niedrig. Es scheint, dass die Inhibitoren die Korrosionsinitiierungszeit verlängern. Es wurde empfohlen, die Untersuchungen fortzusetzen, um klare Ergebnisse zu erhalten.

Laborversuche, bei denen bei einem Teil der chloridverseuchten Prüfkörper zunächst ein MCI in flüssiger Form auf die Grenzfläche und anschliessend eine 1 cm dicke Mörtelschicht mit/ohne MCI aufgebracht wurden, sind in [Fedrizzi 2005] beschrieben. Die beste Wirkung ergab die Kombination der oberflächlichen Applikation mit dem inhibitorhaltigen Mörtel.

In [Søylev 2007] werden die Resultate von Laborversuchen mit zwei verschiedenen Inhibitoren (Amino-Alkohole) erläutert (Bilder 3.16 und 3.17), die nachträglich auf den Beton aufgebracht wurden. Die Versuche dauerten weniger als 3 Monate. Der Inhibitor der neueren Generation (Org2) führte auch bei erhöhten Chloridgehalten zu einer deutlich reduzierten Korrosionsgeschwindigkeit, vorausgesetzt er wurde aufgebracht, bevor die Bewehrung in erheblichem Masse korrodiert war (Korrosionsgeschwindigkeit über 1 bis 2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ bzw. 10 bis 20 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$). Der ältere Inhibitortyp (Org1) zeigte demgegenüber gar

keine Wirkung. Wenn jedoch die Korrosion am Stahl bereits angelaufen ist, waren beide Inhibitoren wirkungslos. Die korrosionshemmende Wirkung wird teilweise auf die Poren verstopfenden Eigenschaften des Inhibitors zurückgeführt.

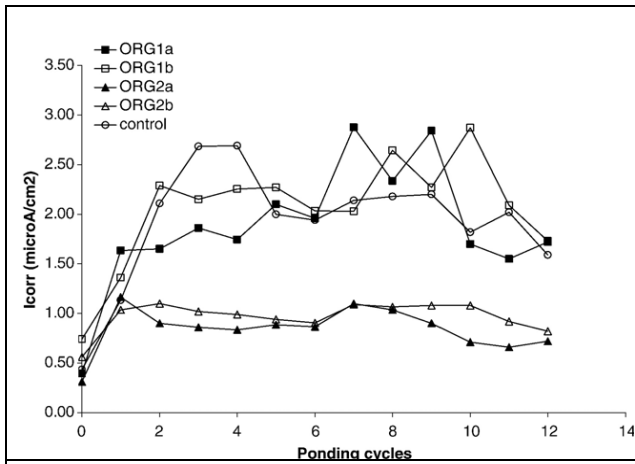


Bild 3.16:

Verlauf des Korrosionsstroms von Probekörpern mit und ohne Inhibitor [Söylev 2007].



Bild 3.17

Aus den Probekörpern ausgebaute Stäbe [Söylev 2007].

*Links: Org1a
Mitte: Referenz
Rechts: Org2a*

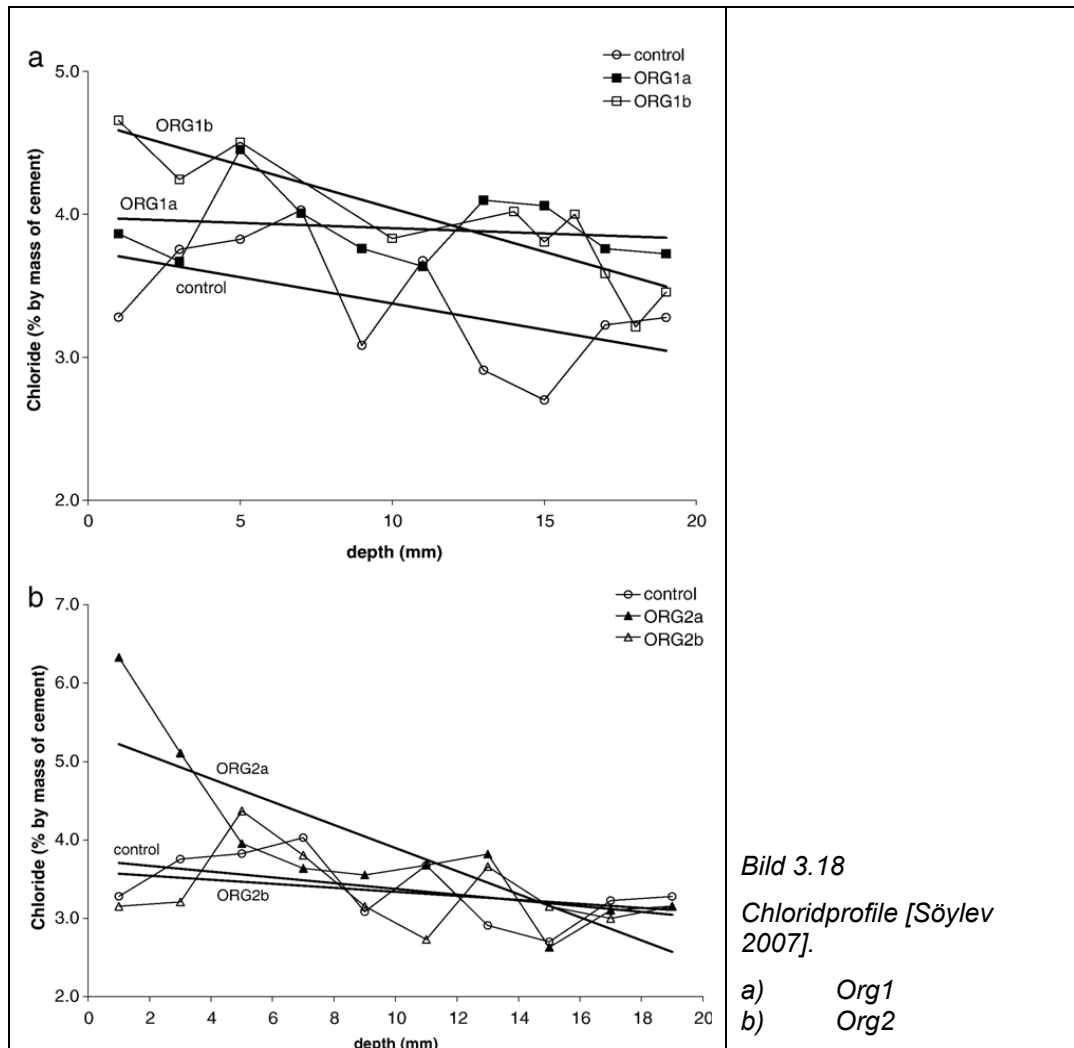


Bild 3.18

Chloridprofile [Söylev 2007].

a) Org1
b) Org2

Einen korrosionshemmenden Einfluss von Aminoalkoholen konnte auch in einer Arbeit von Benzina et al. [Benzina 2008] nachgewiesen werden. Dabei wurden die Proben mit korrodierender Bewehrung in eine inhibitorhaltige Lösung eingetaucht und das Korrosionspotenzial und die Korrosionsgeschwindigkeit ermittelt.

Die Korrosionsgeschwindigkeit, gemessen mit der galvanostatischen Pulsmessung, konnte durch die Behandlung von karbonatisiertem und leicht chloridhaltigem Brückenteilen mit einem Inhibitorsystem (organischer Dampfphaseninhibitor, ionischer anodisch wirkender Inhibitor, Hydrophobierung als Oberflächenschutz) um den Faktor 3.5 reduziert werden [Stephenson 2009]. Das Inhibitorsystem wurde nach dem Betonabtrag und danach erneut auf den Reprofilierungsmörtel aufgetragen. Mit der Behandlung wurde auch die Wasseraufnahme stark reduziert.

Das International Concrete Repair Institute (ICRI) hat 2009 die Instandsetzung eines stark geschädigten Getreide- und Futtermittelsilos in Lagoa auf den Azoren mit dem „Award of Excellence“ ausgezeichnet [ICRI 2009]. Das Silo wurde 1980 gebaut (Gleit-schalung) und musste bereits 1999 wegen starker Korrosionsschäden grossflächig (ca. 30 % der Fläche) instandgesetzt werden (**Bild 3.19**). Die Karbonatisierung des wenig dichten Betons (mittlere Druckfestigkeit um 25 N/mm²) und der Chlorideintrag (bis 1 M.%) über Luft (Meernähe) hatten zur Bewehrungskorrosion und grossflächigen Abplatzungen geführt. Die Evaluation der möglichen Massnahmen führte aus Kostengründen zum Ent-scheid, den losen Beton abzutragen und danach mit Spritzbeton zu reprofiliere. Die fertige Betonoberfläche wurde anschliessend mit einem MCI behandelt und mit einer Beschichtung auf Acrylharzbasis versehen. Mittels korrosionstechnischen Messungen über die nachfolgenden Jahre konnte nachgewiesen werden, dass die Korrosionsgeschwindigkeit in den instand gesetzten Bereichen stark reduziert werden konnte. Anzumerken

ist, dass hier die günstige Wirkung der Instandsetzung sicher nicht alleine auf den Einsatz des Inhibitors zurückzuführen ist.

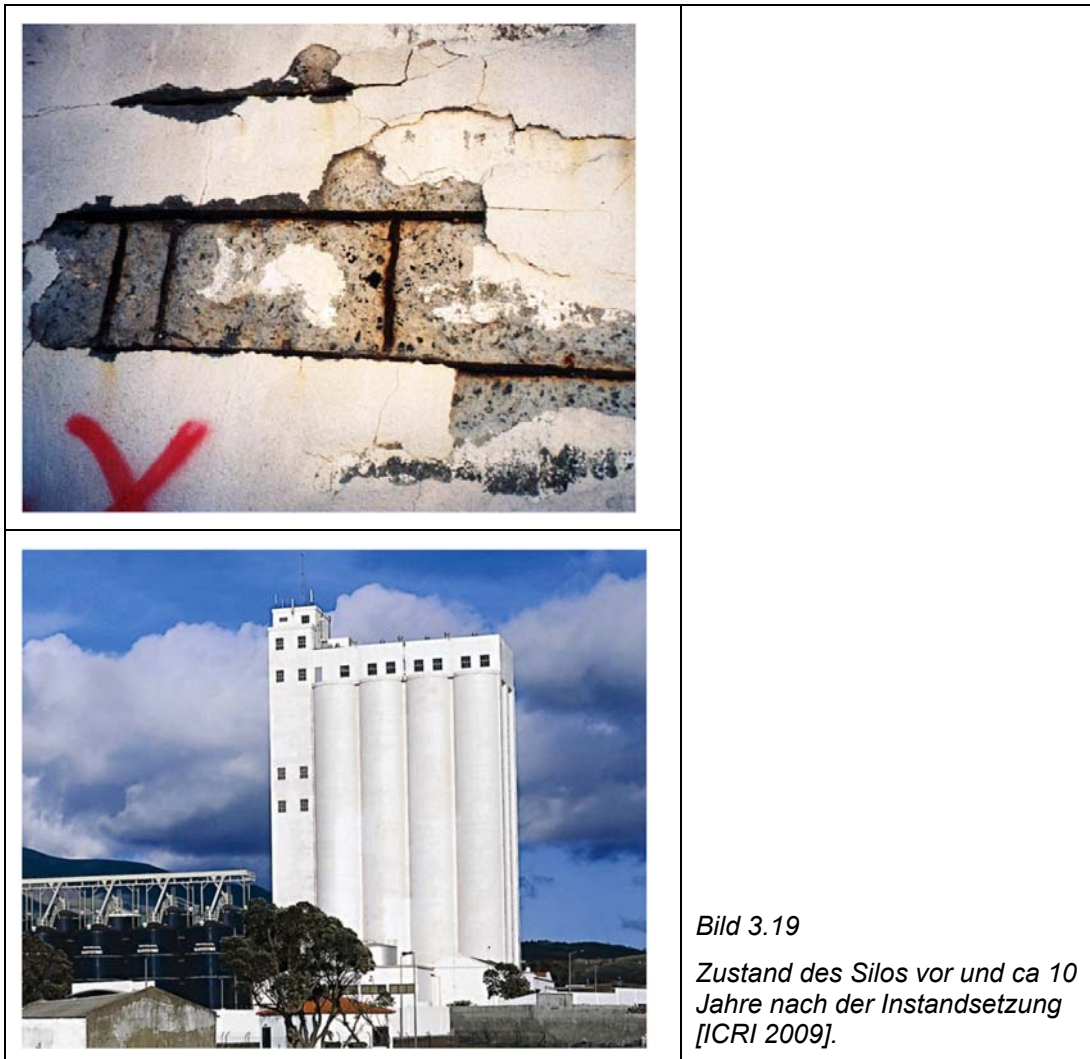


Bild 3.19

Zustand des Silos vor und ca 10 Jahre nach der Instandsetzung [ICRI 2009].

Die im Rahmen des Samaris-Projektes realisierten Feldversuche führten zur Erkenntnis, dass für die Wirksamkeit bei den mit dem Inhibitor behandelten Bauteilen von mehreren Faktoren abhängig ist [Samaris 2006b]. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden Empfehlungen für die praktische Anwendung von Inhibitoren zur Instandsetzung formuliert [Samaris 2006c]. Demnach ist der Einsatz von Inhibitoren bei geringen Chloridgehalten und wenig korrodierter Bewehrung eine gute Option. Hohe Chloridgehalte (über 1 bis 2 M.%/Z) und/oder stark korrodierte Bewehrungsstäbe ist die Wirkung von Inhibitoren nicht mehr sichergestellt. Dies deckt sich weitgehend mit [Hunkeler 2001].

3.5 Untersuchungen in der Schweiz

In einer ersten praktischen Untersuchung zum Einsatz von Inhibitoren bei Stahlbetonbauten wurde anfangs der 1990er Jahre die Wirkung des MFP in der Galerie Rofla und an einer Brückenbrüstung in Baden untersucht. Darüber wurde verschiedentlich informiert [Schmalz 1993, Gassner 1996, Malric 1996]. Die Ergebnisse dieses Feldversuches waren unbefriedigend.

1995 wurde auf die Initiative vom Tiefbauamt des Kt. Uri hin die Arbeitsgruppe „Behandlung von chloridbelastetem Beton“ gebildet. Ziel der AG war es, Methoden zur Behandlung von chloridverseuchtem Beton zu finden, ohne diesen abtragen zu müssen. Anlass

für diese Arbeiten gab ein Anbieter eines Produkts (Teveka SF), das als Salzstabilisator angeblich in der Lage sein sollte, Chloride chemisch zu binden und auf diese Weise die Bewehrungskorrosion zum Stillstand zu bringen. Im Rahmen eines Feldversuchs wurde an Betonelementen des Naxbergtunnels die Wirksamkeit dieses Produkts untersucht [Keller 1997]. Die Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen waren:

- a) Die Chloridanalysen ergaben keine Hinweise darauf, dass durch die Behandlung des Betons mit dem Produkt Teveka SF die Chloride gänzlich oder teilweise immobilisiert oder auf irgendeine Art eingebunden wurden.
- b) Im Vergleich zur Situation vor der Behandlung ist der andersartige Verlauf der Chloridprofile nach der Behandlung mit grosser Sicherheit auf eine Änderung des Betonfeuchtigkeitsprofils durch die Hydrophobierung des Elementes (reduzierter Wassereintrag) zurückzuführen.
- c) Die Resultate der elektrischen Widerstandsmessung ergaben, abgesehen von einer etwas verzögerten Wasseraufnahme in den äussersten Betonrandschicht, keinen Hinweis auf die Wirkung des Produkts Teveka SF.
- d) Die Potentialmessungen vor und nach der Behandlung des Betons mit dem Produkt Teveka SF zeigen keine signifikanten Unterschiede.

Zusammenfassend wurde festgehalten, dass sich das Produkt Teveka SF als Massnahme gegen chloridinduzierte Korrosion nicht eignet.

In einem weiteren 2001 abgeschlossenen Feldversuch an Wandelementen im Naxbergtunnel, Kt. Uri, wurde die Wirksamkeit von Sika FerroGard-903 und MFP unter Praxisbedingungen vergleichend geprüft [Hunkeler 2001, Schiegg 2007]. Die Untersuchung hatte zum Ziel:

- die Wirksamkeit der eingesetzten Inhibitoren nachzuweisen
- Erfahrungen für eine effiziente Überwachung von mit Inhibitoren instand gesetzten Stahlbetonbauwerken zu gewinnen.

Für diesen Feldversuch wurden etwa in Tunnelmitte 16 Elemente ausgewählt. Mit verschiedenen Messmethoden wurde versucht, Aufschluss über Veränderungen der Korrosionsgeschwindigkeit und der korrosionsrelevanten Faktoren zu erhalten. Die Auswertung und Beurteilung der Messresultate führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Weder FerroGard-903 noch MFP führten zu einer Verlangsamung des bereits laufenden, chloridinduzierten Korrosionsprozesses. Zum Vergleich wurden die vier unbehandelten Referenzelemente herangezogen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Chloridgehalte teilweise recht hoch waren.
- Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Inhibitoren sind Korrosionsstrommessungen gut geeignet. Unabhängig von detaillierten Kenntnissen über die eigentliche Wirkung des Inhibitors erlauben sie eine direkte Aussage über die Entwicklung der Korrosionsgeschwindigkeit. Die gemessenen Korrosionsströme sind stark temperatur- und feuchtigkeitsabhängig. Sie haben sich durch die Inhibitorbehandlung kaum verändert. Es traten praktisch nur saisonal bedingte Schwankungen auf.

Einschränkend ist zu betonen, dass diese Schlussfolgerungen nur für Bauteile mit chloridinduzierter Korrosion gelten. Über die Wirksamkeit der Inhibitoren bei karbonatisiertem Beton erlaubte der Feldversuch keine Aussagen.

Die Gründe dafür, dass bei den durchgeführten Feldversuchen mit chloridinduzierter Bewehrungskorrosion keine inhibierende Wirkung (Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit) nachzuweisen war, sind vielfältig:

- ungenügende inhibierende Wirkung der Substanzen wegen der hohen Chloridgehalte (Hinweis: Im Produktdatenblatt von Sika FerroGard-903 ist seit Mai 2006 festgehalten, dass der Inhibitor bei Chloridgehalten über 1 M.%/Z nicht eingesetzt werden sollte.)

- langer Transportweg (Betonfeuchtigkeit zu hoch bzw. zu tief, hohe Überdeckung, dichter Beton)
- Korrosionsprodukte auf der Bewehrung als Barriere für die Adsorption des Inhibitors auf der Stahloberfläche
- zu geringe Beeinflussung der kathodischen Reaktion
- alkalisches Milieu/hoher pH-Wert bzw. Reaktionen des Inhibitors mit dem Betonporenwasser.

In der Schweiz gibt es, abgesehen von kleinen Testflächen (z.B. Compognabrücke Thuisis) und einem von der Sika AG finanzierten Pilotversuch, keine grösseren Anwendungen mit Inhibitoren bei Neubauten.

Die stark exponierten Mauerkronen der Stützmauern bei der Compognabrücke bei Thuisis, Kanton Graubünden, wurden 1998 versuchsweise unterschiedlich ausgebildet, um die Dauerhaftigkeit verschiedener Massnahmen überprüfen und vergleichen zu können. Dabei wurden einerseits der Inhibitor Sika FerroGard-901 als Betonzusatzmittel in Kombination mit normaler Bewehrung (S 500) und andererseits die nichtrostenden Stähle mit den Werkstoffnummern 1.4571 (CrNiMo-Stahl) und 1.4003 (Cr-Stahl, TOP12) eingesetzt. Die nachträglichen Labor- und Feldmessungen ergaben nach 5-jähriger Nutzungszeit des Bauwerks noch keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Chloridgehalt und Korrosionspotenzial [Hunkeler 2005]. Seither sind keine weiteren Messungen mehr vorgenommen worden.

Der Pilotversuch der Sika AG, Zürich, wird mit drei speziell für diesen Zweck hergestellten Stahlbetonelementen (210 x 170 x 20 cm³) durchgeführt. Dazu wurden drei luftporenhaltige Betonsorten verwendet: a) Referenzbeton mit CEM I 42,5 und w/z 0.46 (R); b) wie Referenzbeton aber mit Sika Ferrogard-901 und w/z 0.45 (FG); c) wie Referenzbeton, aber mit Silikastaub und w/z 0.48 (SF). Die drei Elemente wurde 1995 in einem Werkhof in Chur hergestellt und anschliessend an der Autobahn A13 bei der Ausfahrt Bonaduz aufgestellt. Seither wurden mehrmals Untersuchungen durchgeführt. Dem neuesten Bericht der SGK [SGK 2009] zu den Messungen von 2008 kann Folgendes entnommen werden:

- a) Die Chloridprofile unterscheiden sich bei den drei Betonen kaum (**Bild 3.20**). Die Gehalte haben seit 2004 nicht mehr wesentlich zugenommen.
- b) Die Potenzial- und Korrosionsstrommessungen lassen darauf schliessen, dass bei allen Elementen Korrosionsstellen vorhanden sind (Überdeckung der äusserste Bewehrung: 15 mm). Das Ausmass der Korrosion ist beim Element mit dem Referenzbeton aber deutlich grösser als bei den beiden anderen Elementen.
- c) Der Zustand der Elemente mit dem Inhibitor und dem Silikastaub sind vergleichbar.
- d) Der Unterschied zwischen dem Referenzelement und dem Element mit dem Inhibitor wird zunehmend grösser.

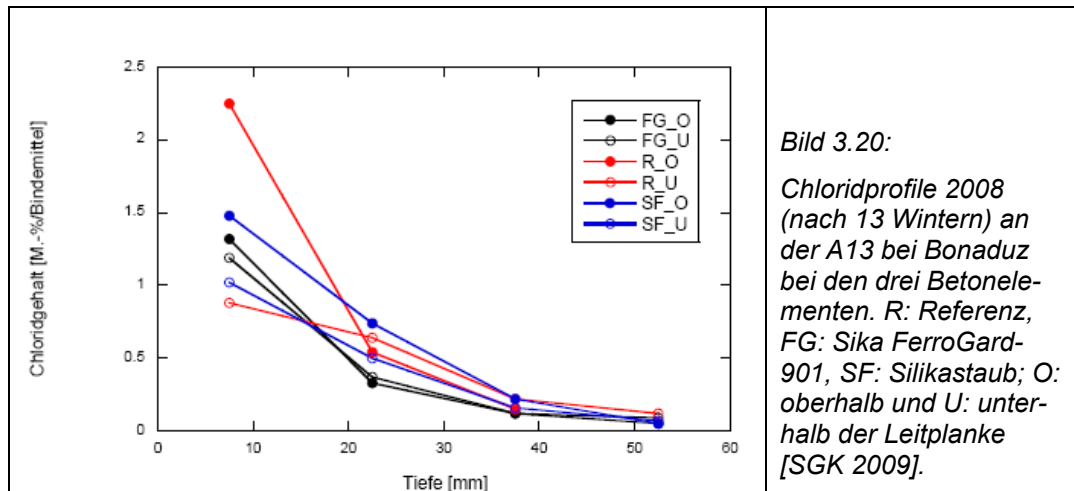


Bild 3.20:

Chloridprofile 2008 (nach 13 Wintern) an der A13 bei Bonaduz bei den drei Betonelementen. R: Referenz, FG: Sika FerroGard-901, SF: Silikastaub; O: oberhalb und U: unterhalb der Leitplanke [SGK 2009].

Wegen der Langfristigkeit der Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit bei Neubauten sind zurzeit noch keine Resultate vorhanden, die eine einigermaßen gesicherte und abschliessende Beurteilung der Wirksamkeit von Inhibitoren ermöglichen.

Im Rahmen von Instandsetzungen wurden in der Vergangenheit in der Schweiz hauptsächlich zwei Typen von Inhibitoren eingesetzt. Es handelt sich dabei um Sika FerroGard-903 der Sika AG, Zürich, und um MFP der MFP SA, Genf. Beide Inhibitoren werden in mehreren Arbeitsgängen auf die Betonoberfläche aufgetragen. Diese Inhibitoren wurden bei diversen Bauten (i. a. Hochbauten) eingesetzt (z.B. [Malric 1995, Dietrich 1997, 1998, Brühwiler 1999a,b, Rota 1999, Baublatt 1999]). Bei den meisten dieser Anwendungen gab es keine Überwachung der langfristigen Wirkung bzw. des Erfolgs der Massnahmen. Häufig fehlte dabei auch eine hinreichende Charakterisierung des Ausgangszustandes.

In [Büchler 2005] werden die Ergebnisse einer Felduntersuchung vorgestellt. Im Labor instrumentierte Bohrkerns wurden als Sensoren in zwei Stützen der Galerie Cianca Pressella der Autobahn A13, Kt. Graubünden, eingebaut. Einer dieser Bohrkerns wurde mit Protectosil CIT behandelt. Auf Grund der Ergebnisse wurde geschlossen dass die Behandlung zu einer Verringerung der Abtragsgeschwindigkeit führt (**Bild 3.21**). Möglicherweise tritt sogar eine teilweise Repassivierung unter der Einwirkung des Produktes auf. Allerdings wird eingeräumt, dass die Messungen keine Klärung des detaillierten Wirkmechanismus ermöglicht und, wegen der hydrophobierenden Eigenschaft des Produktes, ein Teil der Wirkung auf die Verhinderung des Wasser- und Chlorideintrags sowie auf den dadurch erhöhten elektrischen Betonwiderstand zurückgeführt werden könnte. Diese Ergebnisse werden durch Laborversuche bestätigt [SGK 2007].

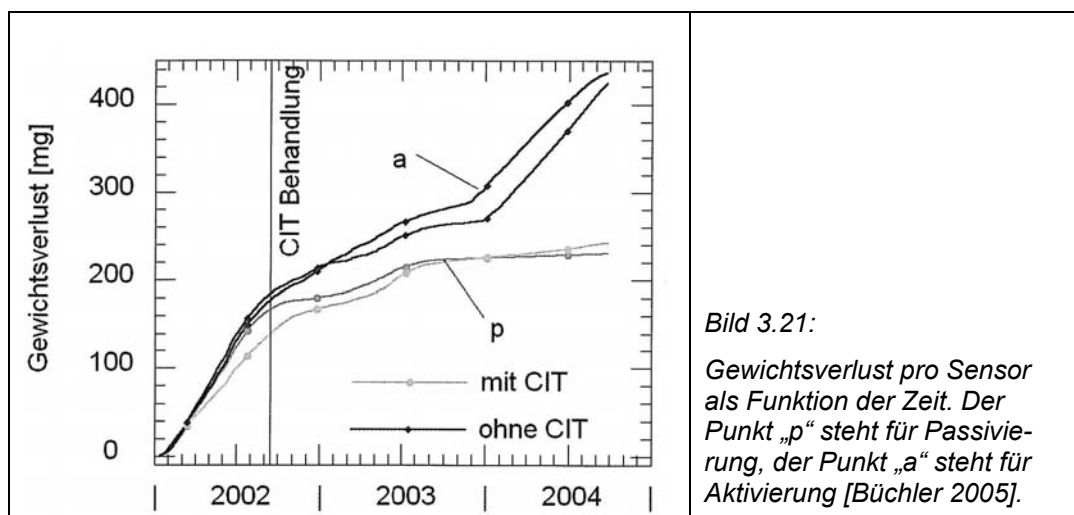


Bild 3.21:

Gewichtsverlust pro Sensor als Funktion der Zeit. Der Punkt „p“ steht für Passivierung, der Punkt „a“ steht für Aktivierung [Büchler 2005].

Spezifische Untersuchungen und Überlegungen zum Eintrag bzw. zur Reaktion des MFP mit dem Betonporenwasser wurden von Gerdes und Wittmann gemacht [Gerdes 1998].

Untersuchungen mit den so genannten migrierenden Korrosionsinhibitoren des Typs, wie er von der Sika in ihren Produkten verwendet wird, wurden vom IBWK und der SGK durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in [Elsener 1999a,b, 2000] publiziert.

Instandsetzungsmörtel bzw. -beton mit integriertem Korrosionsinhibitor (Tecnochem) wurden in der Schweiz erstmalig bei der Brücke in Melide in den Jahren 1995 und 1996 angewendet. Resultate von Nachuntersuchungen sind uns nicht bekannt.

3.6 Zusammenfassung und Folgerungen

Weltweit gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zur Wirkung von Inhibitoren. Weder bei der präventiven noch kurativen Anwendung gibt es einen Konsens. Viele Resultate und Folgerungen widersprechen sich. Einige davon können sicher auf die unterschiedliche Versuchsdurchführung und Messtechnik zurückgeführt werden.

In der umfassenden Feldstudie von Mott McDonald [Mott 2003] über die Wirksamkeit von Instandsetzungsverfahren kam man zum Schluss, dass zur Beurteilung von Inhibitoren weitere Untersuchungen nötig sind.

In einer Publikation der European Federation of Corrosion [Raupach 2007] hat Elsener den aktuellen Stand der Kenntnisse zum Einsatz von Inhibitoren zusammengefasst [Elsener 2007]. Er kommt zum Schluss, dass Inhibitoren eine starke präventive Wirkung haben können, d.h. den Korrosionsbeginn stark hinauszögern können. Demgegenüber konnte mit der nachträglichen oberflächlichen Applikation von Inhibitoren (kurative Behandlung) bei bereits laufender Korrosion keine signifikante Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit nachgewiesen werden.

Søylev und Richardson [Søylev 2008] haben in einer kürzlich publizierten Arbeit ebenfalls den Stand der Kenntnisse zur Anwendung von Inhibitoren zusammengefasst. In dieser Arbeit werden die drei wichtigsten Inhibitorenarten erläutert:

- Amine und Aminalkohole und deren Salze mit organischen und anorganischen Säuren
- CNI, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, Kalziumnitrit (teilweise auch Natriumnitrit). Anmerkung: In [Lee 2007] wird auch mit LiNO_2 experimentiert.
- MFP ($\text{Na}_2\text{PO}_3\text{F}$), Natrium-Monofluorophosphat.

Die Autoren kommen zum Schluss, dass es einfacher ist, mit Inhibitoren den Korrosionsbeginn hinauszuzögern als einen laufenden Korrosionsprozess zu bremsen. Sie weisen weiterhin auf die sehr geringe Datenmenge aus Langzeituntersuchungen an realen Strukturen hin.

Die Ergebnisse zeigen, dass es wichtig ist, praxisnahe Prüfungen an Inhibitoren durchzuführen. Erst damit ist eine sichere Beurteilung möglich.

4 Laboruntersuchungen Teil 1: Haftverbund

4.1 Prüfkörper

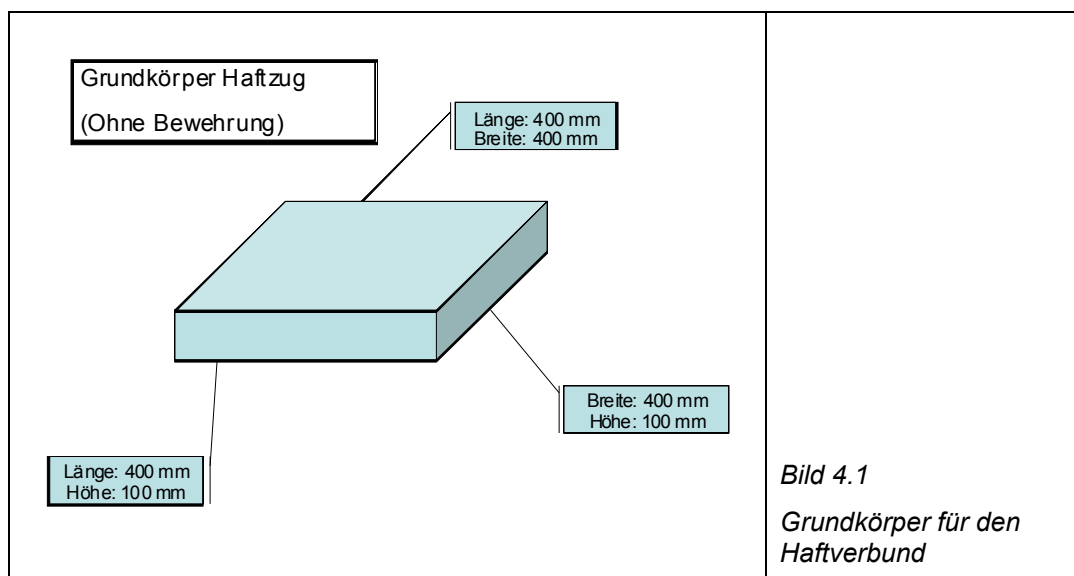
Bei allen Instandsetzungen mit Reprofilierungsmörteln ist der Haftverbund des Mörtels auf dem Altbeton von grosser Bedeutung. Mit der durchgeführten Versuchsanordnung sollten die Auswirkungen des Auftrags von Inhibitoren auf Betonausbruchflächen untersucht werden, wie sie bei Instandsetzungen nach dem Betonabtrag entstehen.

Um die Auswirkungen des Korrosionsinhibitors auf den Haftverbund zu prüfen, wurden Prüfkörper, bestehend aus einem 100 mm dicken Grundkörper aus Beton mit einer 20 mm dicken Mörtelbeschichtung, hergestellt. In der Verbundfuge zwischen der Mörtelbeschichtung und dem Grundkörper aus Beton wurde der Korrosionsinhibitor appliziert.

Herstellung der Prüfkörper (**Bilder 4.1 und 4.2**):

- Grundkörper: Platten (Abmessung: 400 mm x 400 mm x 100 mm) mit und ohne chloridhaltigem Beton („Mischung 1“ mit 0 M.-%/Z und „Mischung 4“ mit 2 M.-%/Z)
- Nachbehandlung der Platten und Untergrundvorbereitung
- Nach 28 Tagen wurden die Platten mit Korrosionsinhibitor und Mörtel beschichtet. Es wurden 3 verschiedene Produktsysteme geprüft. Als Referenz diente der Untergrundbeton
- Messung der Haftzugfestigkeit nach 28 Tagen.

Auf der Basis der Resultate der Haftzugprüfungen wurden 2 Produktsysteme für den Teil 2 der Laborversuche zur Bestimmung des Korrosionsverhaltens ausgewählt (siehe **Kapitel 5**).



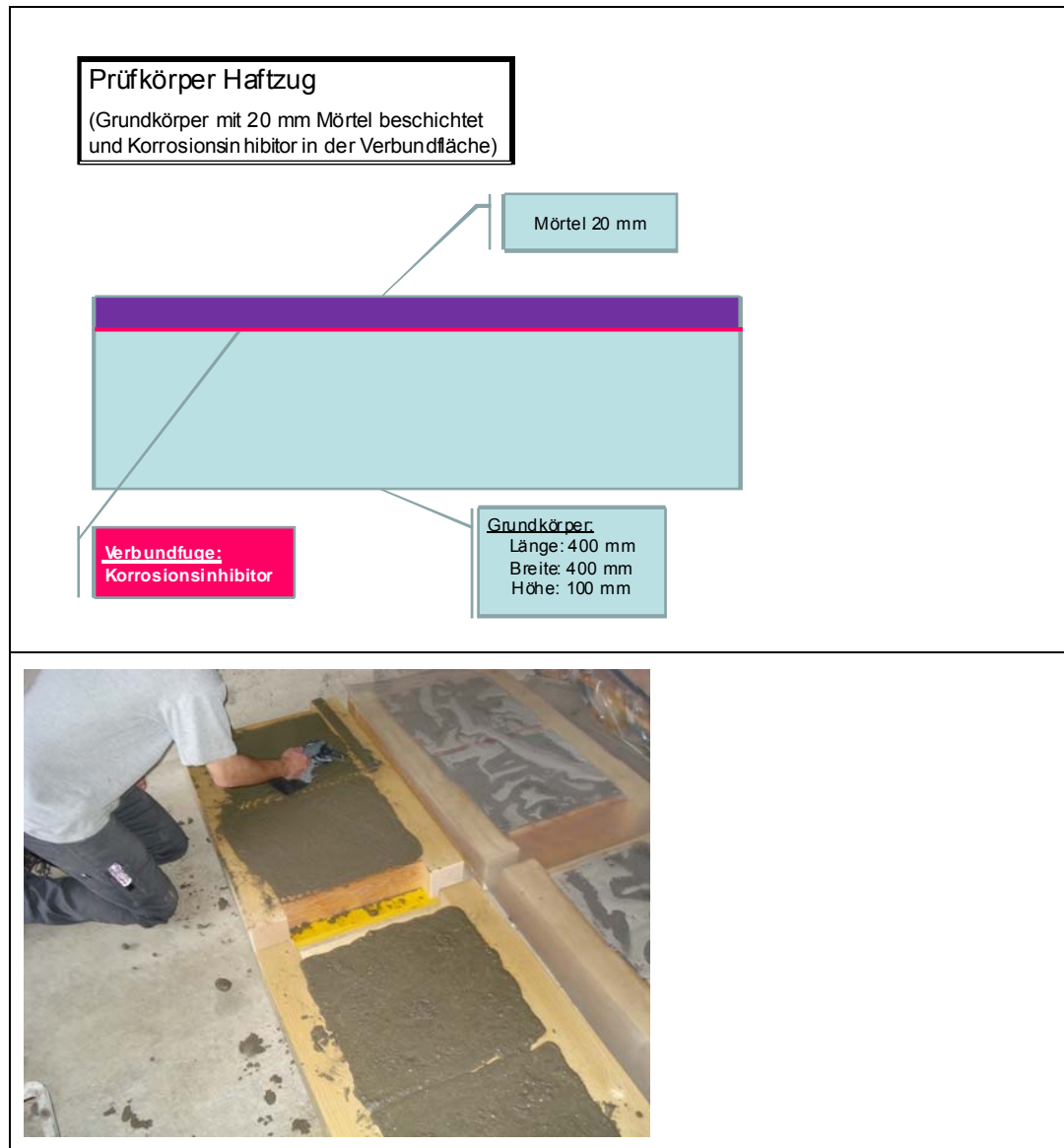


Bild 4.2 Aufbau und Herstellung der Verbundkörper für die Prüfung des Haftverbundes

4.1.1 Angaben zum Beton

Für die Herstellung der Grundkörper wurden ein üblicher Beton verwendet ($w/z = 0.5$ und 300 kg/m^3 CEM I). Zur Mischung Nr. 4 wurden dem Anmachwasser Chloride beigegeben. Die wichtigsten Kenndaten für den Beton sind in den **Tabellen 4.1 und 4.2** dargestellt. Die effektiv an den Würfeln gemessenen Chloridgehalte sind aufgrund der Lagerung im Wasserbad niedriger (Auswaschung).

Tabelle 4.1 Betonmischungen für die Grundkörper

Mischung	w/z-Wert	Chloridgehalt [M.%/CEM]	Luftgehalt [Vol.-%]	Zement (CEM I 42.5 N) [kg/m ³]	Gesteinskörnungen					Zusatzmittel [% CEM]
					0/2	0/4	4/8	8/16	16/32	
Nr. 1	0.5	0	1.0	300	12%	24%	8%	24%	32%	0
Nr. 4	0.5	2	0.9	300	12%	24%	8%	24%	32%	0

Tabelle 4.2 Resultate der Frisch- und Festbetonprüfungen

Mischung	Chloridgehalt	Konsistenz		Rohdichte	Würfeldruckfestigkeit (Mittelwert)
	[M.%/CEM]	[mm]	Klasse	[kg/m ³]	[N/mm ²]
Nr. 1	0	370	F 2	2430	49.0
Nr. 4	1.24, 1.72	400	F 2	2440	43.8

4.1.2 Nachbehandlung

Die Grundkörper wurden nach dem Betonieren 4 Tage in der Schalung belassen und mit Folie abgedeckt. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper 4 Wochen bei ca. 10°C Lufttemperatur und 90 % Luftfeuchtigkeit gelagert.

4.1.3 Untergrundvorbereitung

Nach der 4wöchigen Lagerung () wurden die Platten mit Hochdruckwasserstrahlen aufgeraut (Rautiefe ca. 1.7 mm, Sandflächenverfahren) (**Bild 4.3**). Verunreinigungen nach dem Aufrauen wurden mittels Druckluft entfernt.



Abb. 4.3 Untergrundvorbereitung und Reprofilierung.

4.1.4 Applikation Korrosionsinhibitor

Die drei verschiedenen Korrosionsinhibitor-Produkte (**Tabelle 4.3**) wurden jeweils auf eine Platte aus jeder Mischung appliziert. Die Applikation erfolgte in 2 bis 3 Arbeitsgängen gemäss Herstellerangaben (**Tabelle 4.4**). Vorher wurde die Feuchtigkeit des Betons kapazitiv geprüft.

Tabelle 4.3 Systemübersicht

System	Beschreibung des Inhibitors
System A	Aminoalkohol
System B	Aminocarboxylat
System 3	Silan, Aminoalkohol

Tabelle 4.4 Applikation der Korrosionsinhibitor-Produkte

System	Probekörper	Menge	Arbeitsgänge	Chloridgehalt	Datum	Temp.	r. F.	Oberflächenfeuchtigkeit
	[Nr.]	[g/m ²]	[Stck.]	[M.-%/Z]		[° C]	[%]	[%; CM]
System A	10	500	3	0	19.06.07	23	61	< 4
	17	475	3	2	19.06.07	23	61	< 4
System B	6	319	2	0	27.06.07	19	61	< 4
	12	306	2	2	27.06.07	19	61	< 4
System 3	8	606	2	0	14.06.07	24	52	< 4
	19	531	2	2	14.06.07	24	52	< 4

- System A wurde vom Personal der Forschungsstelle appliziert. Die Flüssigkeit wurde vom Beton langsamer aufgenommen als bei System 3. Zwischen den einzelnen Arbeitsgängen lagen daher Trockenzeiten von 1 bzw. fast 3 Stunden. Bei den ersten beiden Arbeitsgängen wurden ca. drei Viertel der gesamten Auftragsmenge appliziert; beim letzten Arbeitsgang noch das restliche Viertel, das vermutlich nicht vollständig aufgenommen werden konnte, da die Oberfläche am folgenden Tag (noch feuchtes) Restmaterial aufwies. Die Oberfläche wurde anschliessend mit Hochdruckwasser (ca. 125 bar) gereinigt, bevor der Mörtelauftrag erfolgte. Die behandelten Betonoberflächen zeigten danach aber keinen Abperleffekt.
- System B wurde ebenfalls vom Personal der Forschungsstelle appliziert. Vor der 2. Applikation war die Oberfläche noch mattfeucht. Zwischen den beiden Arbeitsgängen lag eine Trockenzeit von 8 Stunden. Bei beiden Applikationen wurde jeweils etwa 50 % der gesamten Auftragsmenge aufgebracht. Die Oberfläche war nach dem Abtrocknen am folgenden Tag erkennbar feucht. Beim anschliessenden Reinigen mit Hochdruckwasser bildete sich Schaum. Es wurde so lange gereinigt, bis kein Schäumen mehr auftrat.
- Die Applikation von System 3 wurde von einem Anwendungstechniker des Produktlieferanten durchgeführt. Zwischen den beiden Arbeitsgängen mit jeweils etwa der Hälfte der gesamten Auftragsmenge lag ca. 1 Std. Trockenzeit. Die behandelten Betonoberflächen zeigten anschliessend einen deutlichen Abperleffekt.

4.1.5 Applikation Mörtel

Ein Tag nach Applikation des Inhibitors erfolgte der Mörtelauftrag gemäss Herstellerangaben, ggf. einschliesslich Haftbrücke, mit einer Gesamtschichtdicke von ca. 20 mm (**Tabelle 4.5**).

Tabelle 4.5 Applikation Mörtelprodukte

System	Probekörper	Chlorid	Datum
	[Nr.]	[M.-%/Z]	
System A	5, 10	0	20.06.07
	11, 17	2	
System B	3, 13	0	28.06.07
	6, 12	2	
System 3	8, 9	0	15.06.07
	18, 19	2	

- Die Haftschlämme von System A wurde in einem langsam drehenden automatischen Mischer hergestellt und in die mattfeuchte Betonoberfläche eingebürstet. Der Reparaturmörtel wurde mit 3.25 Liter Wasser (laut PDB 3.0 bis 3.5 Liter Wasserzufuhr bei Handapplikation möglich) im selben Mischer hergestellt. Der Mörtel wies eine sehr weiche, luftige Konsistenz auf. Die Applikation erfolgte durch Personal der Forschungsstelle.
- Der 2-komponentige Mörtel von System B wurde direkt auf die Oberfläche appliziert, ohne eine Haftbrücke aufzubringen,. Die Mischung erfolgte in einem automatischen Mischer. Verarbeitet wurden nur die beiden Komponenten. Eine Wasserzugabe war nicht erforderlich. Der Mörtel war anfänglich sehr weich und wurde innerhalb der Verarbeitungszeit von etwa 45 Minuten etwas steifer.
- Die Applikation von System 3 wurde von einem Anwendungstechniker des Produktlieferanten durchgeführt. Die „Haftbrücke“ wurde durch zusätzliche Wasserzugabe zu der Reparaturmörtelmischung hergestellt, um eine weichere Konsistenz zu erreichen und in den Untergrund gebürstet. Der Mörtel wurde anschliessend „frisch-in-frisch“ aufgetragen.
- Alle Platten wurden unabhängig von den applizierten Produkten mindestens 2 Tage in der Schalung belassen und mit Folie abgedeckt. Anschliessend wurden sie bis zur Haftzugprüfung nach 28 Tagen bei ca. 15 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert.

4.2 Haftzugprüfungen

4.2.1 Versuchsdurchführung

Die Haftzugprüfungen wurden an 120 mm langen und 50 mm durchmessenden Bohrkerne im Labor durchgeführt, die durch die gesamte Platte gebohrt worden waren. Je Platte wurden 3 Bohrkerne geprüft. Die Prüfung wurde analog Rili-SIB des DAfStb [DAfStb 2001] mit einer Belastungsgeschwindigkeit für starre Systeme von 0.05 N/mm²·s durchgeführt.

4.2.2 Resultate

Die Resultate der Haftzugprüfungen sind in der **Tabelle 4.6** zusammenfassend ausgewertet.

Tabelle 4.6 Resultate Haftzugprüfungen

Prüfkörper / Produkte	Probe 1		Probe 2		Probe 3		MW [N/mm ²]	SA [N/mm ²]
	[N/mm ²]	[Bruch]	[N/mm ²]	[Bruch]	[N/mm ²]	[Bruch]		
H/0/0-R1	2.77	A	1.70	A	1.61	A	2.03	0.6
H/0/0-R2	2.90	A	1.90	A	2.90	A	2.57	0.6
H/0/2-R1	2.11	A	2.88	A	2.13	A	2.37	0.4
H/0/2-R2	2.40	A	1.10	A	0.80	A	1.43	0.9
H1/0-R	1.95	B	1.44	A/B	1.99	B	1.79	0.3
H1/0-KI	1.55	A/B	1.62	A/B:B 75/25	1.46	A/B	1.54	0.1
H1/2-R	1.38	A/B	1.82	A/B:B 90/10	1.87	A/B:B 80/20	1.69	0.3
H1/2-KI	1.40	A/B	1.86	A/B:B 80/20	1.24	A/B:B 95/5	1.50	0.3
H2/0-R	1.73	A	1.75	A:B 90:10	1.95	A	1.81	0.1
H2/0-KI	1.55	A	1.77	B	2.58	A	1.97	0.5
H2/2-R	2.15	A	1.71	A	2.23	A:A/B 90:10	2.03	0.3
H2/2-KI	2.12	A:A/B 10:90	1.85	A	2.06	A:A/B 20:80	2.01	0.1
H3/0-R	2.80	A:A/B 70:30	2.80	A	1.90	A	2.50	0.5
H3/0-KI	2.40	B	1.80	A:A/B 90:10	2.50	A/B	2.23	0.4
H3/2-R	3.10	A:B 40:60	1.30	A	2.80	A	2.40	1.0
H3/2-KI	3.00	A/B	2.60	A/B	2.20	A	2.60	0.4
<u>Bruchart:</u> A: Kohäsionsversagen des Betonsubstrats B: Kohäsionsversagen in der ersten Schicht A/B: Adhäsionsversagen zwischen dem Substrat und der ersten Schicht						<u>Auswertung:</u> MW: Mittelwert SA: Standardabweichung		

4.2.3 Beurteilung

Die Resultate für System 3 lagen im Mittel niedriger als für die beiden anderen Systeme. Ausserdem trat der Bruch bei den Systemen A und B vorwiegend im Betonuntergrund auf, wohingegen bei System 3 eine Tendenz zum Verbundversagen zwischen Mörtel und Betonuntergrund zu erkennen ist, da viele Brüche A/B (Adhäsionsversagen) festgestellt wurden. Aus Grund dieser Ergebnisse wurde die Systeme A und B, das System 3 hingegen nicht für den Teil 2 der Laborversuche eingesetzt (siehe **Kapitel 5**).

5 Laboruntersuchungen Teil 2: Korrosion

Mit dem zweiten Teil der Laborversuche sollten die Gegebenheiten bei der Anwendung von Inhibitoren zur Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen mit chloridinduzierter Korrosion an der Bewehrung im Labormassstab simuliert und die Wirksamkeit von Inhibitoren geprüft werden.

Aufgrund der Resultate des 1. Teils der Laborprüfungen (Haftverbund) wurden die Versuche des Teils 2 (Korrosion) nur noch mit den beiden aus dem Teil 1 evaluierten zwei Inhibitorsystemen A und B durchgeführt. In Zusammenarbeit mit einem Anbieter wurde ergänzend das System C geprüft.

5.1 Prüfkörper

Die Prüfkörper für die Korrosionsversuche wurden analog zu den Prüfkörpern für den Haftverbund hergestellt: d. h. eine quadratische Platten mit 400 mm Kantenlänge und 100 mm Höhe aus chloridhaltigem Beton als Grundkörper, die nach einer gewissen Korrosionszeit mit einer 20 mm Mörtelschicht beschichtet wurden. In der Verbundfuge zwischen Grundkörper und Mörtel wurde der Korrosionsinhibitor appliziert (**Bilder 5.1 bis 5.3**).

Im Grundkörper wurden auf den je gegenüberliegenden Seiten jeweils 3 Bewehrungsstäbe mit unterschiedlichen Betonüberdeckungen einbetoniert, um die Korrosionsströme überwachen zu können. Die Bewehrungsstäbe wurden bis auf einen 50 mm langen Abschnitt beschichtet, damit sich an jedem Stab ein genau definierter Anodenbereich ausbilden konnte.

Als Kathode diente eine Netzbewehrung aus nichtrostendem Stahl 1.4571. Das Flächenverhältnis Kathode zu allen 6 Anoden liegt bei ca. 8 (für eine Anode bei ca. 46). Dieses Verhältnis ist im Vergleich zur Praxis tief. Noch kleinere Anoden zu verwenden, ist aber wenig sinnvoll und der Einsatz grosserer Probekörper wurde wegen des Gewichts vermieden.

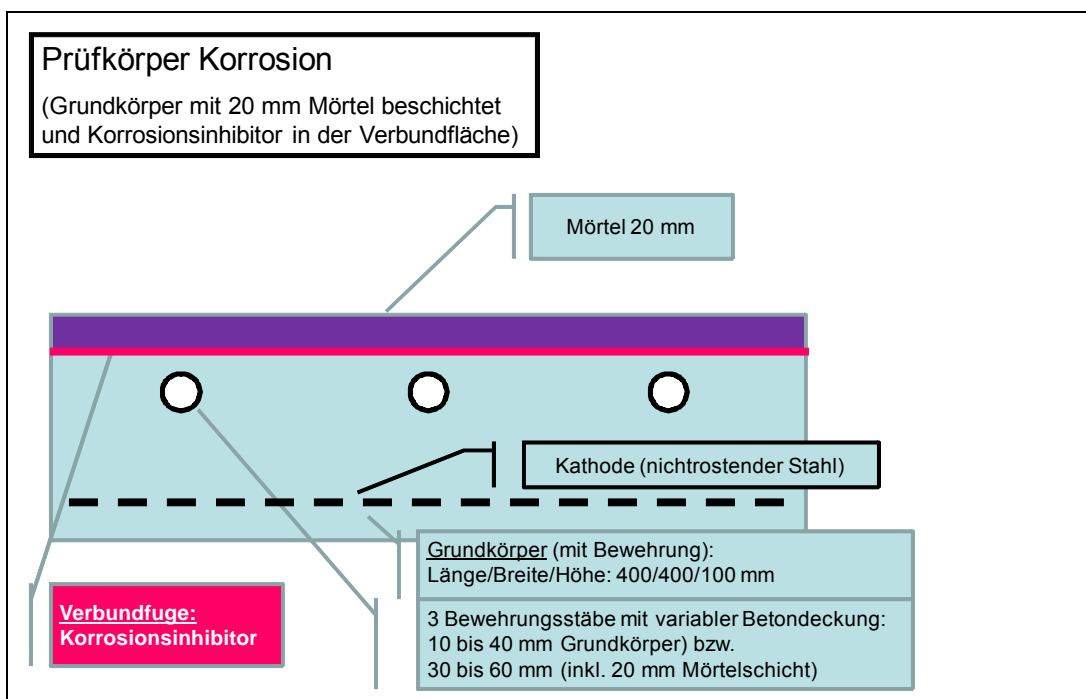


Bild 5.1 Aufbau Verbundkörper Korrosion.

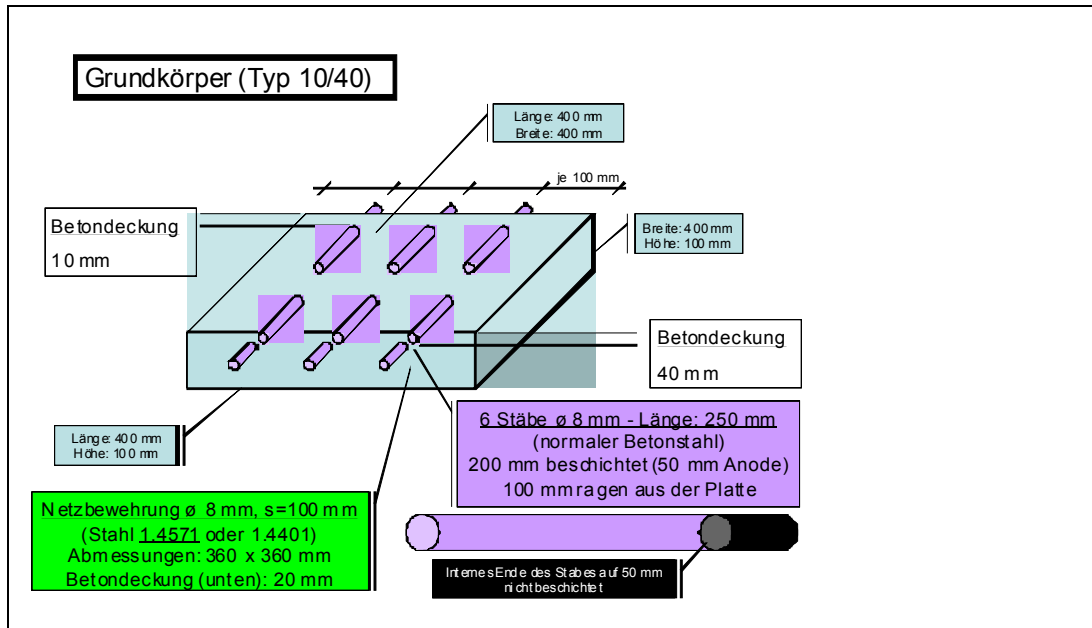


Bild 5.2 Grundkörper für die Korrosionsversuche



Bild 5.3 Beschichtete Bewehrungsstäbe mit Anodenbereich. Unten liegt die nichtrostende Netzbehebung.

Nach einer ca. 9-monatigen Auslagerungsperiode (freie Bewitterung auf dem Dach der Forschungsstelle) zwischen den Monaten Juli 2007 und April 2008 mit Monitoring des Korrosionsverhaltens wurde die nächste Versuchsphase eingeleitet: Simulation der Instandsetzung.

Um die Instandsetzung zu simulieren, wurden die Platten mit Hochdruckwasser gestrahlt. Anschliessend wurde auf die aufgeraute Betonoberfläche die Instandsetzungssysteme A, B und C appliziert (Korrosionsinhibitor und eine 20 mm dicke Mörtelschicht mit oder ohne Inhibitor).

5.1.1 Angaben zum Beton

Für die Herstellung der Grundkörper wurden ein üblicher Beton verwendet ($w/z = 0.5$ und 300 kg/m^3 CEM I). Dem Anmachwasser der „Mischungen 3, 5 und 6“ wurden Chloride in drei verschiedenen Mengen beigegeben. Die wichtigsten Kenndaten für den Beton sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Die effektiv an den Würfeln gemessenen Chloridgehalte sind aufgrund der Lagerung im Wasserbad niedriger (Auswaschung).

Tabelle 5.1 Betonmischung für die Grundkörper.

Mischung	w/z-Wert	Chloridgehalt	Luftgehalt	Zement (CEM I 42.5 N)	Gesteinskörnungen	Zusatzmittel
	[-]	[M.%/CEM]	[Vol.-%]	[kg/m ³]	0/2 0/4 4/8 8/16 16/32	[% CEM]
Nr. 2	0.5	0	1.1	300	12% 24% 8% 24% 32%	0.4
Nr. 3	0.5	0.8	1.0	300	12% 24% 8% 24% 32%	0.2
Nr. 5	0.5	2.0	0.9	300	12% 24% 8% 24% 32%	0.2
Nr. 6	0.5	4.0	0.9	300	12% 24% 8% 24% 32%	0.2

Tabelle 5.2 Resultate der Frisch- und Festbetonprüfungen

Mischung	Chloridgehalt	Konsistenz		Rohdichte	Würfeldruckfestigkeit (Mittelwert)
	[M.%/CEM]	[mm]	Klasse	[kg/m ³]	[N/mm ²]
Nr. 2	0	520	F 4	2420	50.3
Nr. 3	0.75, 0.53	450	F 3	2420	46.0
Nr. 5	1.58, 2.02	480	F 3	2430	43.3
Nr. 6	3.02, 3.22	490	F 4	2420	39.2

5.1.2 Nachbehandlung

Die Grundkörper wurden nach dem Betonieren 5 Tage in der Schalung belassen und mit Folie abgedeckt. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper 6 Wochen bei ca. 10°C Lufttemperatur und 90 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Danach erfolgte die Auslagerung.

5.1.3 Auslagerungsperiode I

Die Platten wurden im Zeitraum Juli 2007 bis April 2008 auf dem Dach der Forschungsstelle ausgelagert. Damit sollte die Korrosion an den Einzelstäben in Gang gebracht werden.

5.1.4 Untergrundvorbereitung

Nach Ablauf der 9-monatigen Auslagerung wurden die Platten mit Hochdruckwasserstrahlen aufgeraut (Rautiefe ca. 1.7 mm, Sandflächenverfahren) und Verunreinigungen mittels Druckluft entfernt. Es wurde festgestellt, dass es bei einigen der Stäbe mit 10 mm Betonüberdeckung zu Abplatzungen über korrodierten Stäben gekommen ist. Daraus ist ersichtlich, dass die Stäbe in der Auslagerungsperiode I wie geplant korrodierten (**Bild 5.4**).



Bild 5.4 Aufgeraute Oberfläche der Grundkörper mit sichtbarer Korrosion.

5.1.5 Applikation Korrosionsinhibitor

Die Korrosionsinhibitor-Produkte (Teil des Instandsetzungssystems) wurden jeweils auf zwei Platten aus jeder Mischung in mehreren Arbeitsgängen gemäss Herstellerangaben appliziert. Damit die Platten nach der Auslagerung sowie des HDW-Abtrags ausreichend trocken waren, wurde die Platten vor der Applikation des Inhibitors ca. 100 Std. bei 60 °C getrocknet und die Betonfeuchtigkeit kapazitiv geprüft.

Tabelle 5.3 Systemübersicht

System	Beschreibung des Inhibitors
System A	Aminoalkohol
System B	Aminocarboxylat
System C	Silan, Siloxanbasis (Zusatzmittel)

Tabelle 5.4 Applikation Korrosionsinhibitor

System	Probe- körper	Menge	Arbeits- gänge	Chlorid- gehalt	Datum	Temp.	r.F.
	[Nr.]	[g/m ²]	[Stck.]	M.-%/CEM		[° C]	[%]
System A	21	506	3	0	20.06.08	18	60
	23	519					
	30	479	0.8				
	32	500					
	41	538	2				
	43	513					
50	575	4					
52	500						
System B	22	469	2	0	25.06.08	21	65
	24	469					
	33	481	0.8				
	36	481					
	44	450	2				
	46	444					
	51	519	4				
53	506						

Tabelle 5.4 Applikation Korrosionsinhibitor

System	Probekörper	Menge	Arbeitsgänge	Chloridgehalt	Datum	Temp.	r.F.
System C	35, 37	*	1	0.8	11.06.08	15	60
	42, 47	*		2			
	54, 56	*		4			

* Inhibitor im Mörtel (4 M.-%/CEM)

- **System A** wurde vom Personal der Forschungsstelle in drei Arbeitsgängen appliziert. Zwischen den einzelnen Applikationen lagen Trockenzeiten von ca. 7 bzw. 17 Stunden. Pro Arbeitsgang wurde jeweils etwa ein Drittel der Gesamtmenge appliziert. Nach der 3. Applikation war die Oberfläche trotz ca. 3 Tagen Trockenzeit z. T. leicht matt(feucht). Es kann angenommen werden, dass nicht die gesamte beim 3. Arbeitsgang applizierte Menge vom Beton aufgenommen wurde. Die Oberfläche wurde mit Hochdruckwasser (ca. 125 bar) gereinigt, bevor der Mörtelauftrag erfolgte. Die behandelte Oberfläche zeigte keinen Abperleffekt.
- **System B** wurde vom Personal der Forschungsstelle in zwei Arbeitsgängen appliziert. Zwischen den beiden Applikationen lag eine Trockenzeiten von etwa 17 Stunden. Pro Arbeitsgang wurde jeweils etwa die Hälfte der Gesamtmenge appliziert. Auf der Oberfläche waren nach dem Abtrocknen (5 Tage später) lokal weissliche (kristallartige) Ablagerungen erkennbar. Beim Reinigen mit Hochdruckwasser bildete sich immer wieder Schaum. Es wurde so lange gereinigt, bis kein Schäumen mehr auftrat. Die erforderliche Reinigungszeit war deutlich länger als bei den Platten mit System A.
- **System C** wurde unter Anleitung eines Anwendungstechnikers des Produktlieferanten hergestellt. Der pulverförmige Korrosionsinhibitor (4 M.-%/CEM) wurde dem Trockenmörtel beigegeben und trocken gemischt. Anschliessend erfolgten die Wasserzugabe und die endgültige Mischung.

5.1.6 Applikation Mörtel

Es folgte die Applikation des Mörtels bzw. im Fall von System A auch die Applikation der Haftbrücke. Die verschiedenen Mörtel wurden jeweils 20 mm dick gemäss Herstellerangaben aufgebracht.

Tabelle 5.5 Applikation Mörtel

System	Probekörper	Chlorid	Datum
	[Nr.]	[M.-%/CEM]	
System A	21, 23	0	26.06.08
	30, 32	0.8	
	41, 43	2	
	50, 52	4	
System B	22, 24	0	03.07.08
	33, 36	0.8	
	44, 46	2	
	51, 53	4	
System C	35, 37	0.8	11.06.08
	42, 47	2	
	54, 56	4	

- Die Haftschlämme von System A wurde in einem langsam drehenden automatischen Mischer hergestellt und in die matffeuchte Betonoberfläche eingebürstet. Der Reparaturmörtel wurde mit 3.25 Liter Wasser (laut PDB 3.0 bis 3.5 Liter Wasserzufuhr bei Handapplikation möglich) im selben Mischer hergestellt. Der Mörtel hatte eine sehr weiche, luftige Konsistenz. Die Applikation erfolgte durch das Personal der Forschungsstelle.
- Der 2komponentige Mörtel von System B wurde direkt, ohne eine Haftbrücke aufzubringen, auf die Oberfläche appliziert. Die Mischung erfolgte im selben automatischen Mischer. Verarbeitet wurden nur die beiden Komponenten. Eine Wasserzugabe war nicht erforderlich. Die Konsistenz des Mörtels war sehr weich.
- System C wurde unter Anleitung eines Anwendungstechnikers des Produktlieferanten hergestellt. Der Mörtel enthielt einen vorgängig trocken zugemischten Inhibitor. Aus dieser Mischung wurde vorgängig durch weitere Wasserzugabe eine verdünnte Mischung hergestellt, die als „Haftbrücke“ eingebürstet wurde.
- Alle Platten wurden unabhängig von den applizierten Produkten mindestens 3 Tage in der Schalung belassen und mit Folie abgedeckt. Anschliessend wurden sie mindestens 28 Tage bei ca. 15 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Danach wurden die Seitenflächen und der Boden der Platten hydrophobiert. Ab dem 04.08.2008 begann die erneute Auslagerung (Auslagerungsperiode II) auf dem Dach der Forschungsstelle

5.1.7 Auslagerungsperiode II

Die Platten wurden im Zeitraum August 2008 bis September 2009 wieder auf dem Dach der Forschungsstelle ausgelagert (**Bild 5.5**).

Am Ende der Auslagerungsperiode II wurden die Schlussmessungen durchgeführt: Haftzugprüfung, Korrosionsstrommessungen und Entnahme der Bohrkerne für die Bestimmung der Chloridprofile.

Anschliessend wurden die Platten mittels HDW zerstört, um die Stäbe freizulegen und deren Korrosionszustand visuell bestimmen zu können.



Bild 5.5 Auslagerung der Verbundkörper auf dem Dach der Forschungsstelle.

5.1.8 Korrosionstechnische Messungen während der Auslagerung II

Während der Auslagerung wurden in periodischen Abständen das Potenzial der Einzelstäbe sowie der Ausbreitungswiderstand, die Spannungsdifferenz und der Korrosionsstrom zwischen den Stäben und der Netzbewehrung gemessen. Gegen Ende des Versuchs wurde weiter das Potenzial der nichtrostenden Netzbewehrung (= Kathode) ermittelt.

Die Messungen der verschiedenen Parameter erfolgten wie nachfolgend beschrieben:

- Gesamt-Potenzialmessung: Alle Einzelstäbe waren während der Messung mit der Netzkathode elektrisch verbunden. Die Messung mit der CSE-Elektrode erfolgte an je einer Stelle direkt über den einzelnen Stäben.
- Gesamt-Stromstärke, Gesamt-Spannungsdifferenz und Gesamt-Widerstand: Vor der Messung wurde das Einzelstabbündel (alle 6 Einzelstäbe blieben miteinander elektrisch verbunden) von der Netzkathode getrennt. Die Messungen erfolgten für den jeweiligen Parameter zwischen dem Einzelstabbündel auf der einen und der Netzkathode auf der anderen Seite (Stromfluss zwischen Einzelstabbündel gegen die Netzkathode).
- Einzel-Stromstärke:
 - Schlussmessung (15.09.2009): Vor der Messung wurde das Einzelstabbündel aufgetrennt, so dass alle Stäbe ca. einen halben Tag untereinander elektrisch nicht verbunden waren. Gemessen wurde der Stromfluss zwischen dem einzelnen Stab und der Netzkathode.
 - Übrige Messungen (übrige Termine vor der Schlussmessung): Die Einzelstäbe blieben im Bündel verbunden und nur der jeweils zu messenden Stab wurde aus dem Bündel herausgelöst und gegen die Netzkathode gemessen. Der herausgelöste Stabanschluss wurde nach der Messung nicht wieder in das Bündel eingliedert, so dass nach und nach immer weniger Einzelanschlüsse im Bündel zusammengefasst waren. Bei der fünften Messung eines Prüfkörpers waren z. B. nur noch zwei Stäbe verbunden. Bei der sechsten und letzten Messung war kein Stab mehr im Bündel.
- Einzel-Spannungsdifferenz und Einzel-Widerstand: Vor der Messung dieser Parameter wurde die Einzel-Stromstärke gemessen, so dass das Einzelstabbündel bereits aufgetrennt war und die einzelnen Stäbe bereits etwa einen halben Tag lang elektrisch nicht miteinander verbunden waren (siehe oben) Für jede einzelne Messung wurde dann der jeweilige einzelne Stab gegen die Netzkathode gemessen.

5.1.9 Klimatische Bedingungen während Auslagerung

Angaben zum Wetter konnten von einer privat betriebenen Wetterstation in Niederlenz (Nachbargemeinde) beschafft werden [Bucher 2009]. Die Auswertung (**Tabelle 5.6, Bilder 5.6 und 5.7**) zeigen, dass in den Jahren 2007 bis 2009 keine Besonderheiten auftraten. Die mittlere Lufttemperatur lag bei rund 10 °C, die mittlere relative Luftfeuchtigkeit bei 77%.

Tabelle 5.6: Angaben zum Klima während der Auslagerung

Jahr	Temperatur, °C	Relative Luftfeuchtigkeit, %	Anzahl Regentage	Niederschlag total, l/m ²
2007	9.9	76	184	1'182
2008	9.8	77	162	1'077
2009	10.0	77	177	975

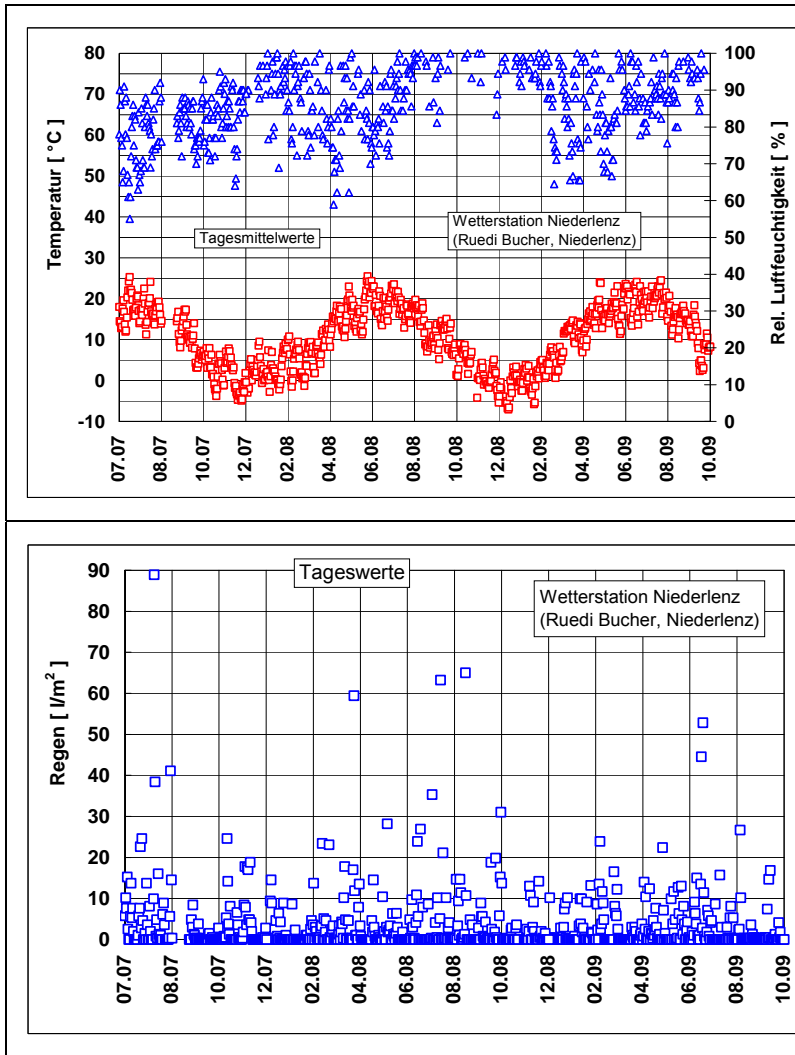


Bild 5.7:
Tageswerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit über die Versuchszeit. Messstation Niederlenz.

Bild 5.7:
Tageswerte der Regenmenge über die Versuchszeit. Messstation Niederlenz.

5.2 Haftzugprüfungen

Um den Haftverbund der Instandsetzungssysteme bzw. um die Auswirkungen der Auslagerung und Korrosion auf den Verbund zu prüfen, wurden die Verbund-Prüfkörper (100 mm dicker Grundkörper mit einer 20 mm dicken Mörtelschicht) nach Ablauf der Auslagerungsperiode II untersucht.

5.2.1 Versuchsdurchführung

Die Haftzugprüfungen wurden gemäss Rili-SIB des DAfStb [DAfStb 2001] mit einer Belastungsgeschwindigkeit für starre Systeme von $0.05 \text{ N/mm}^2\text{-s}$ durchgeführt. Dazu wurden in jeden Verbundkörper drei Nuten durch den Mörtel bis ca. 15 mm tief in den Grundkörper gebohrt. Die Lage der Nuten war zwischen den Anodenstäben angeordnet, damit nicht versehentlich in die Stäbe gebohrt werden konnte.

5.2.2 Resultate

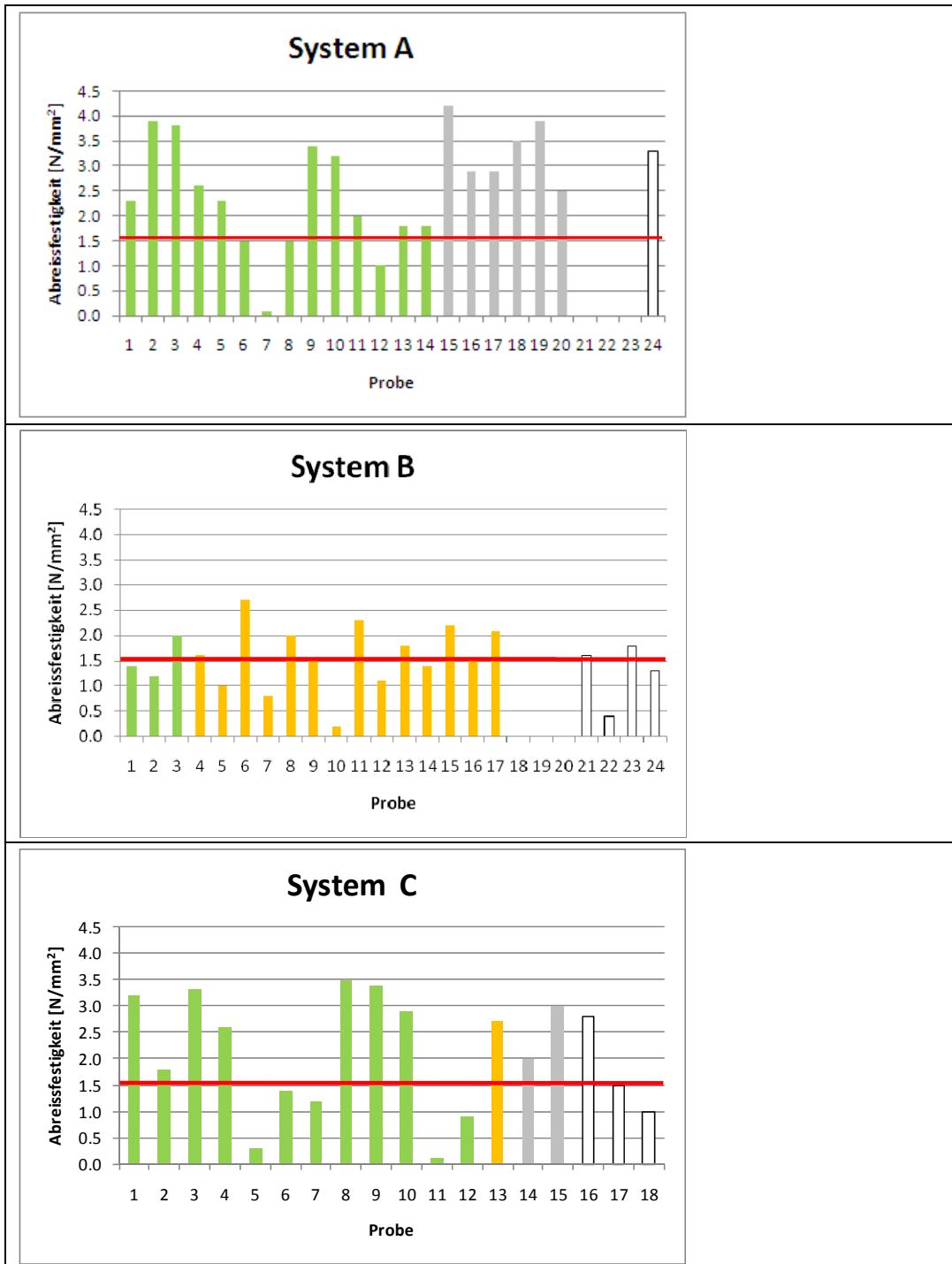
Die Resultate der Haftzugprüfungen sind in der **Tabelle 5.7** zusammengefasst und die Auswertungen in **Bild 5.8** dargestellt.

Tabelle 5.7 Resultate der Haftzugprüfungen am Ende der Versuchszeit

Prüfkörper / Chlorid	Produkte	Probe 1		Probe 2		Probe 3		MW [N/mm ²]	SA [N/mm ²]
		[N/mm ²]	[Bruch]	[N/mm ²]	[Bruch]	[N/mm ²]	[Bruch]		
21	0%	2.3	A	3.5	B	4.2	B	3.3	1.0
23	0%	3.9	A	3.9	B	2.9	B	3.6	0.6
30	0.8%	3.8	A	3.4	A	3.3	A:A/B 70:30	3.5	0.3
32	0.8%	2.9	B	3.2	A	2.5	B	2.9	0.4
41	2%	2.6	A	2.0	A	1.8	A	2.1	0.4
43	2%	2.3	A	1.0	A	1.8	A	1.7	0.7
50	4%	1.5	A	0.0	-	0.0	-	0.5	0.9
52	4%	2.1	A	1.5	A	0.0	-	1.2	1.1
22	0%	1.6	A/B	1.5	A/B	1.4	A/B	1.5	0.1
24	0%	1.0	A/B	0.2	A/B	0.0	-	0.4	0.5
33	0.8%	2.7	A/B	2.3	A/B	2.5	B	2.5	0.2
36	0.8%	0.8	A/B	1.1	A/B	1.5	A/B	1.1	0.4
44	2%	2.0	A/B	1.8	A/B	2.1	A/B	2.0	0.2
46	2%	1.4	A	2.0	A	0.4	A:A/B:B 30:40:30	1.3	0.8
51	4%	1.2	A	0.0	-	0.0	-	0.4	0.7
53	4%	1.8	A:A/B 10:90	1.6	A:B 70:30	1.3	A:B 60:40	1.6	0.3
35	0.8%	2.7	A/B	2.8	A:A/B:B	3.5	A	3.0	0.4
37	0.8%	2.0	B	3.2	A	3.4	A	2.9	0.8
42	2%	1.5	A:A/B	1.8	A	2.9	A	2.1	0.7
47	2%	2.6	A	3.3	A	3.0	B	3.0	0.4
54	4%	0.3	A	1.0	A:B	0.1	A	0.5	0.5
56	4%	1.4	A	1.2	A	0.9	A	1.2	0.3

Bruchart:
A: Kohäsionsversagen des Betonsubstrats
B: Kohäsionsversagen in der ersten Schicht
A/B: Adhäsionsversagen zwischen dem Substrat und der ersten Schicht

Auswertung:
MW: Mittelwert
SA: Standardabweichung



Brucharten

A	Kohäsionsbruch im Beton
A/B	Adhäsionsbruch zwischen Mörtel und Beton
B	Kohäsionsbruch im Mörtel
	diverse Mischformen

Bild 5.8 Haftzugfestigkeit am Ende der Versuchszeit.

5.2.3 Beurteilung

Die Proben von System A brachen mehrheitlich im Beton (Kohäsionsversagen im Beton) bei einem Wert von $> 1.5 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert gilt in den meisten Instandsetzungsnormen als Grenzwert für einen ausreichenden Haftverbund. Die übrigen Proben von System A sind bei einem deutlich höheren Wert von $> 2.5 \text{ N/mm}^2$ im Mörtel gebrochen. Dies lässt darauf schliessen, dass die Mörteldruckfestigkeit deutlich grösser war als die Druckfestigkeit des Betons.

Die Proben von System B liefern deutlich niedrigere Haftzugfestigkeiten. Der Bruch trat mehrheitlich bei ca. 1.5 N/mm^2 in der Verbundzone zwischen Mörtel und Betonuntergrund auf. Dies lässt auf einen tendenziell schlechteren Verbund schliessen als dies bei System A der Fall war.

System C ergibt Werte, die zwischen System A und System B liegen. Die Unterschiede sind eventuell auf den Einfluss der Haftbrücke, die bei System A verwendet wurde, zurückzuführen.

Die Proben mit höheren Chloridgehalten im Betonuntergrund haben tendenziell zu den niedrigeren Haftzugfestigkeiten geführt. Vergleicht man die Werte von System B aus dem Teil 1 (siehe **Tabelle 4.6**), stellt man fest, dass die Werte beim Teil 2 niedriger waren. Bei der Teil 1 betrug der Mittelwert mehrheitlich $> 2.0 \text{ N/mm}^2$ bei einem Bruch im Betonsubstrat gegenüber dem Wert von 1.5 N/mm^2 und dem Bruch in der Verbundzone nach der Instandsetzung. Dies könnte auf einen Einfluss der Bewehrungskorrosion bzw. des erhöhten Chloridgehaltes im Betonuntergrund auf die Haftzugfestigkeit hindeuten.

5.3 Korrosionstechnische Messungen

Im **Anhang I** sind die Ergebnisse tabellarisch zusammengestellt.

5.3.1 Korrosionspotenzial

Das Korrosionspotenzial ist in den Farbplots der Nullmessung vom 23.7.2007, der letzten Messung vor der Instandsetzung vom 1.4.2008 und der Schlussmessung vom 17.9.2009 gezeigt (**Bilder 5.8a bis c**). Die Instandsetzung wurde in den Monaten Juni/Juli 2008 durchgeführt (s. **Tabelle 5.4 und 5.5**).

Aus dem Vergleich der Bilder geht hervor, dass das Korrosionspotenzial der Bewehrung wenig von der Überdeckung, aber sehr stark vom Chloridgehalt abhängig ist. Bei der Nullmessung (**Bild 5.8a**) waren auch die Potenziale der Prüfkörper mit einem Chloridgehalt von 0.8 M.%/Z noch deutlich negativ. Diese wurden aber mit der Zeit erheblich positiver (**Bilder 5.8b und c**).

Chlorid, M.%	Mittelwert Potenzial, in Abhängigkeit von der Überdeckung											
	10 mm			20 mm			30 mm			40 mm		
0%	-90	-107	-99	-53	-74	-67	-53	-71	-78	-97	-101	-91
	-70	-101	-100	-71	-100	-95	-80	-93	-94	-67	-86	-84
	-51	-90	-86	-33	-82	-81	-35	-63	-65	-49	-82	-76
0.80%	-344	-366	-353	-335	-334	-324	-303	-322	-312	-315	-330	-328
	-367	-356	-354	-280	-330	-311	-260	-305	-309	-312	-330	-322
	-297	-321	-309	-298	-328	-318	-275	-314	-314	-288	-316	-314
	-261	-304	-288	-255	-302	-321	-246	-291	-287	-258	-271	-266
2%	-461	-479	-445	-433	-456	-464	-433	-443	-435	-424	-422	-416
	-403	-445	-455	-439	-443	-442	-417	-424	-444	-390	-395	-404
	-438	-436	-443	-410	-440	-433	-412	-413	-404	-417	-402	-399
	-445	-440	-455	-427	-428	-440	-414	-416	-411	-417	-418	-431
4%	-522	-540	-541	-492	-536	-529	-519	-526	-528	-511	-521	-510
	-532	-516	-531	-510	-538	-537	-528	-526	-532	-501	-502	-505
	-498	-522	-532	-513	-514	-517	-515	-529	-523	-472	-517	-513
	-532	-531	-518	-534	-541	-527	-493	-520	-531	-476	-493	-500
	Skalierung											
	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0	

Bild 5.8a: Einfluss des Chloridgehaltes und der Überdeckung auf das Potenzial (Mittelwerte) der verschiedenen Prüfkörper. Nullmessung vom 23.7.2007.

Chlorid, M.%	Mittelwert Potenzial, in Abhängigkeit von der Überdeckung											
	10 mm			20 mm			30 mm			40 mm		
0%	20	-6	30	-36	-10	-8	13	-13	-10	-15	10	5
	-40	-22	-7	-13	-18	-16	-38	-16	-6	-40	-45	-10
	8	0	-5	30	-7	-12	16	-1	-16	31	12	15
0.80%	-24	-38	-38	-28	-43	-42	-27	-58	-73	-18	-37	-43
	4	0	-13	-93	-120	-107	-112	-102	-107	-4	6	-8
	-33	-25	-32	-82	-84	-66	-85	-79	-72	-35	-30	-27
	-22	-24	-16	-15	-18	-30	-20	-33	-26	-29	-13	-17
2%	-267	-237	-316	-380	-320	-310	-313	-309	-281	-271	-282	-269
	-374	-343	-363	-290	-293	-263	-280	-271	-285	-270	-311	-314
	-260	-318	-360	-271	-318	-360	-281	-301	-290	-284	-294	-300
	-328	-374	-329	-312	-275	-285	-279	-263	-261	-328	-310	-296
4%	-490	-510	-480	-511	-540	-526	-487	-500	-487	-485	-493	-475
	-464	-444	-473	-480	-555	-530	-550	-530	-510	-420	-433	-430
	-480	-450	-478	-464	-490	-520	-485	-530	-510	-440	-478	-454
	-460	-444	-415	-508	-547	-530	-525	-500	-535	-425	-435	-424
	Skalierung											
	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0	

Bild 5.8b: Einfluss des Chloridgehaltes und der Überdeckung auf das Potenzial (Mittelwerte) der verschiedenen Prüfkörper. Messung vom 1.4.2008, letzte Messung vor der Instandsetzung mit dem Inhibitorsystem im Juni/Juli 2008.

Chlorid	10			20			30			40						
0%	-50	-56	-37	-15	-18	-12	-38	-29	-36	-63	-62	-45				
	45	43	38	6	2	50	-10	20	22	36	48	39				
	-30	-58	-44	-40	-60	-55	-48	-35	-18	-59	-22	26				
0.80%	-110	-109	-155	-75	-100	-84	-100	-62	-72	-128	-112	-97				
	-48	-72	-56	-17	-5	-18	-16	-14	-16	-50	-76	-80				
	-10	-10	3	-61	-82	-85	-67	-74	-44	5	-50	-40				
	90	75	90	68	48	68	79	76	86	76	71	75				
2%	-133	-98	-76	-290	-255	-206	-245	-255	-256	-96	-112	-79				
	-200	-193	-186	-194	-206	-218	-211	-218	-220	-206	-214	-218				
	-100	-160	-110	-120	-130	-160	-130	-120	-155	-98	-102	-101				
	-314	-251	-360	-245	-200	-200	-194	-195	-175	-353	-393	-366				
	-444	-390	-420	-433	-427	-428	-480	-512	-484	-502	-467	-442				
4%	-288	-305	-288	-444	-395	-410	-445	-450	-405	-305	-385	-395				
	-357	-320	-336	-336	-410	-336	-395	-415	-395	-400	-420	-380				
	-403	-440	-503	-424	-434	-468	-440	-470	-450	-470	-515	-515				
						Skalierung										
						-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0

Bild 5.8c: Einfluss des Chloridgehaltes und der Überdeckung auf das Potenzial (Mittelwerte) der verschiedenen Prüfkörper. Schlussmessung vom 15.9.2009.

In den nachfolgenden Bildern sind verschiedene Zusammenhänge dargestellt.

- Potenzial-Zeit-Verlauf (**Bilder 5.9a bis d**): Der zeitliche Verlauf des Potenzials ist, abgesehen von den deutlich negativeren Werten nach der Instandsetzung, bei allen Prüfkörpern ähnlich. Die Potenziale der behandelten Prüfkörper sind leicht positiver als jene der Referenzprüfkörper. Daraus alleine darf aber noch keine positive Wirkung der Inhibitoren abgeleitet werden. Wichtiger noch als das Potenzial sind die ermittelten Abtragsraten (siehe **Kapitel 5.3.4**).
- Potenzial Einzelstäbe vs. Mittelwert Potenzial (**Bilder 5.10a und b**): Es sind keine Ausreisser erkennbar, d.h. alle Resultate dürfen einbezogen werden.
- Mittelwert Potenzial 30 bzw. 40 mm vs. Mittelwert Potenzial 10 bzw. 20 mm (**Bilder 5.11a und b**): Die Überdeckung hat keinen wesentlichen Einfluss auf das Potenzial.
- Potenzial vs. Überdeckung (**Bilder 5.12a und b**): Die Überdeckung hat keinen wesentlichen, der Chloridgehalt einen erheblichen Einfluss auf das Potenzial.
- Chloridgehalt vs. Potenzial (**Bilder 5.13a bis d**): Teilweise sind starke Potenzialverschiebungen vorhanden. Dies ist z.B. bei den Messungen direkt vor und nach der Instandsetzung gut erkennbar (vorab bei 0% und 0.8%: - 50 bis -150 mV negativere Werte nach der Instandsetzung). Im stark chloridhaltigen Beton reagieren die Potenziale weniger empfindlich. Bei der letzten Messung fallen einzelne Punkte auf (bei 0.8%, System C).

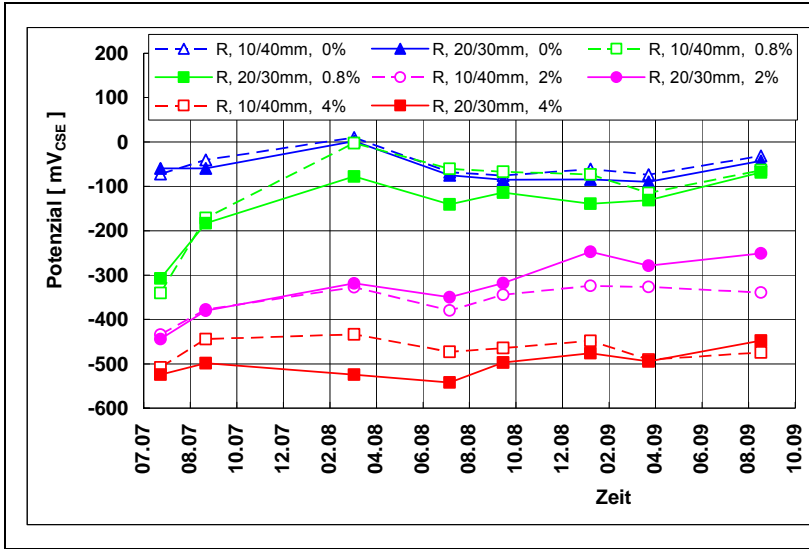


Bild 5.9a:
Zeitlicher Verlauf des Potentials des Referenzprüfkörpers (Mittelwerte).

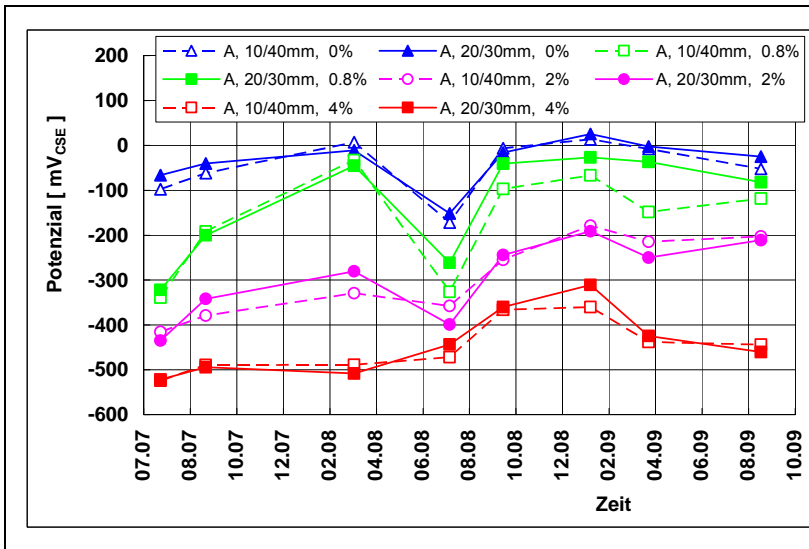


Bild 5.9b:
Zeitlicher Verlauf des Potentials des Prüfkörpers mit dem System A (Mittelwerte).

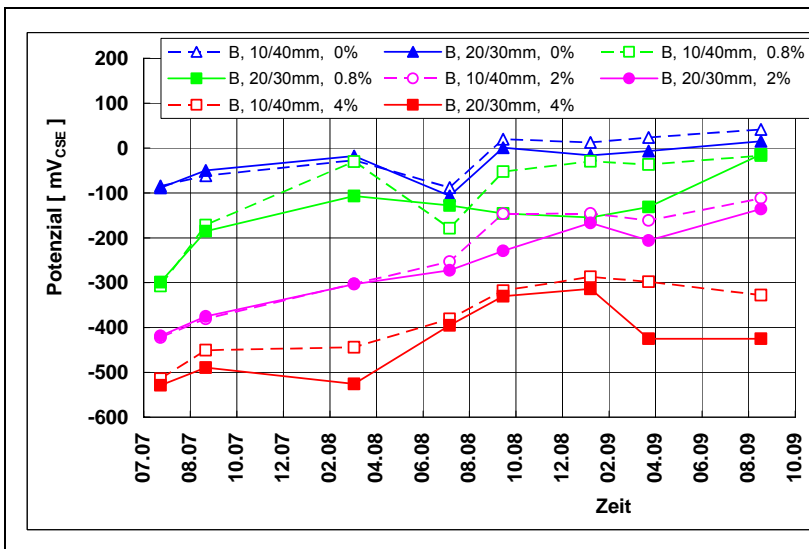
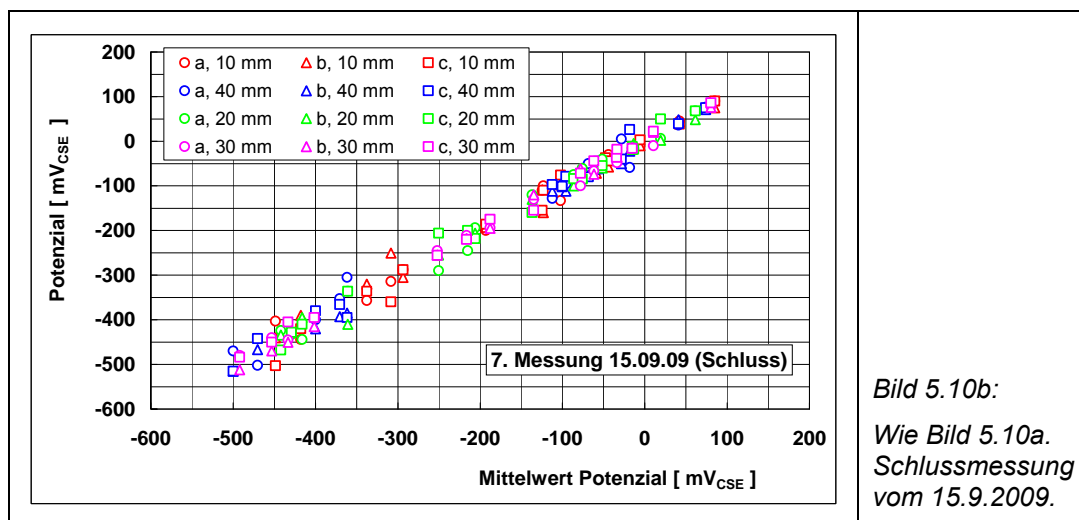
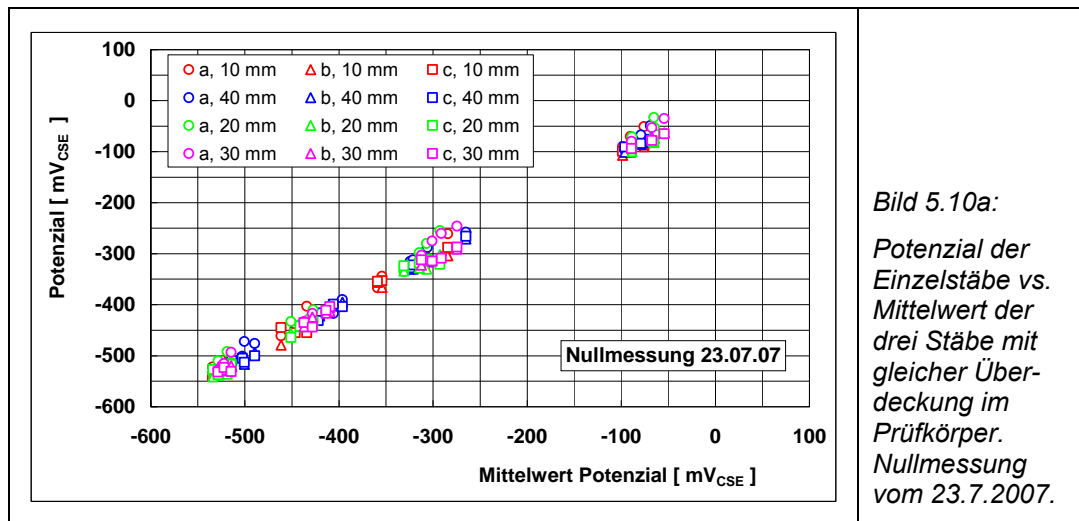
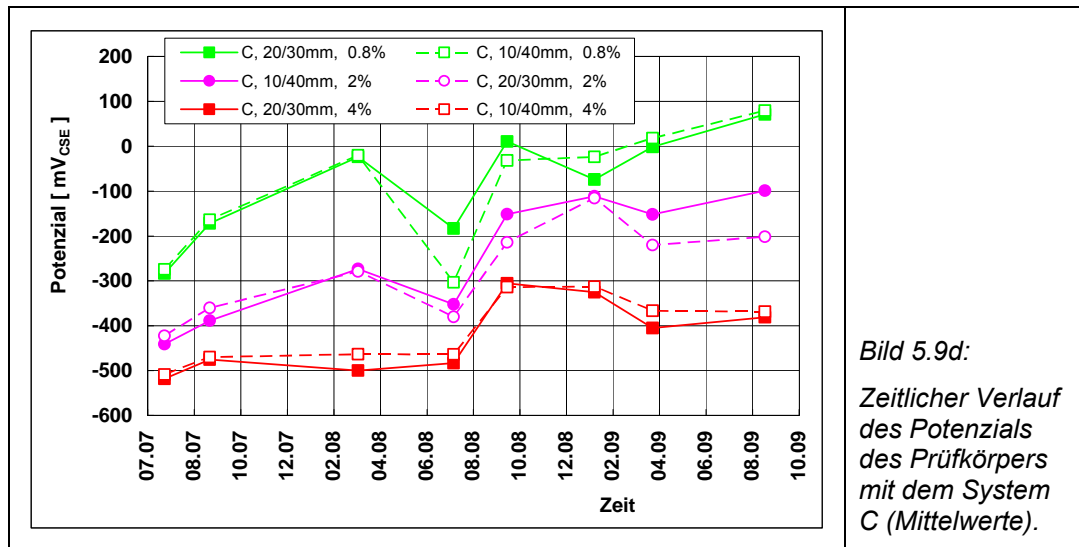


Bild 5.9c:
Zeitlicher Verlauf des Potentials des Prüfkörpers mit dem System B (Mittelwerte).



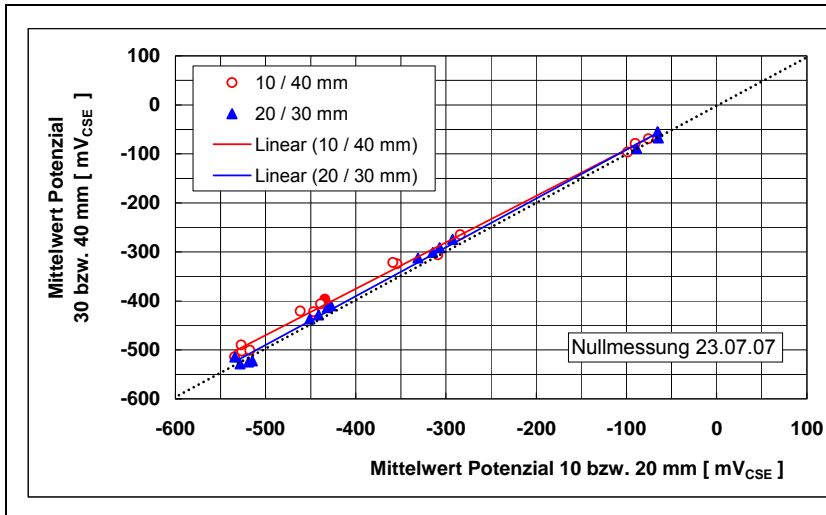


Bild 5.11a:

Mittelwert des Potentials der Stäbe mit der Überdeckung 30 bzw. 40 mm vs. Mittelwert des Potentials der Stäbe mit der Überdeckung 10 bzw. 20. Nullmessung vom 23.7.2007.

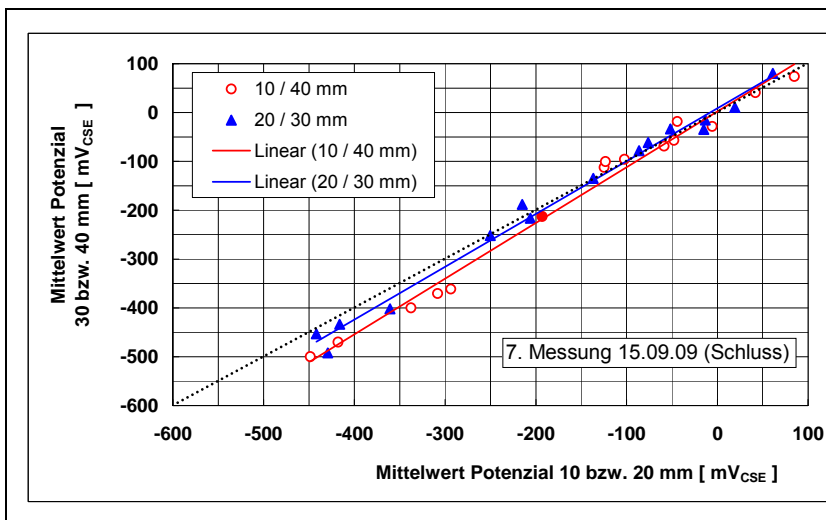


Bild 5.11b:

Wie Bild 5.11a. Schlussmessung vom 15.9.2009.

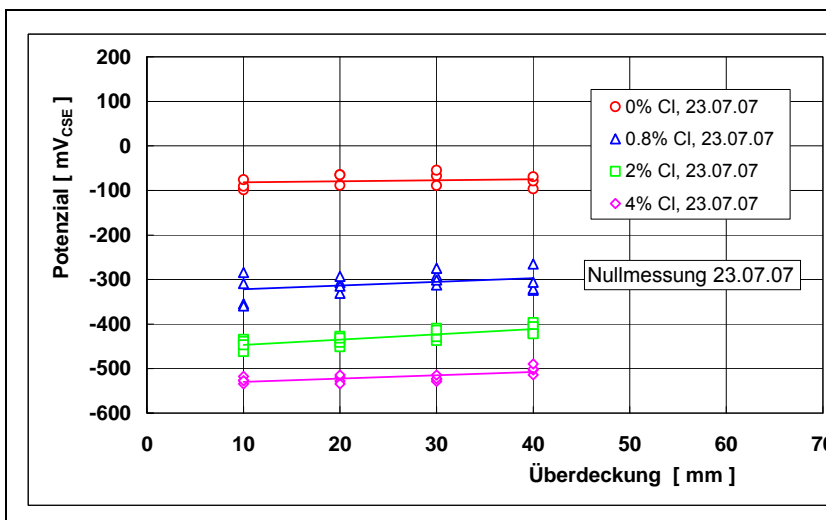


Bild 5.12a:

Potenzial der Stäbe in Abhängigkeit von der Überdeckung. Nullmessung vom 23.7.2007.

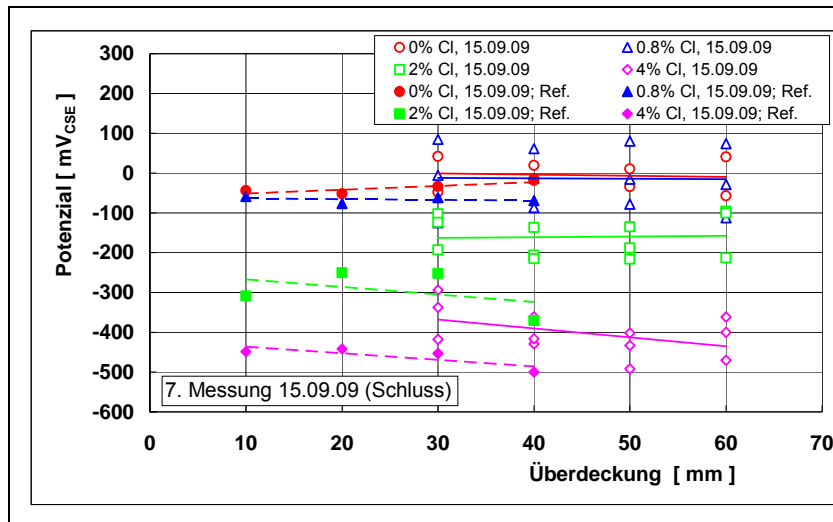


Bild 5.12b:
Potenzial der Stäbe in Abhängigkeit von der Überdeckung. Schlussmessung vom 15.9.2009.

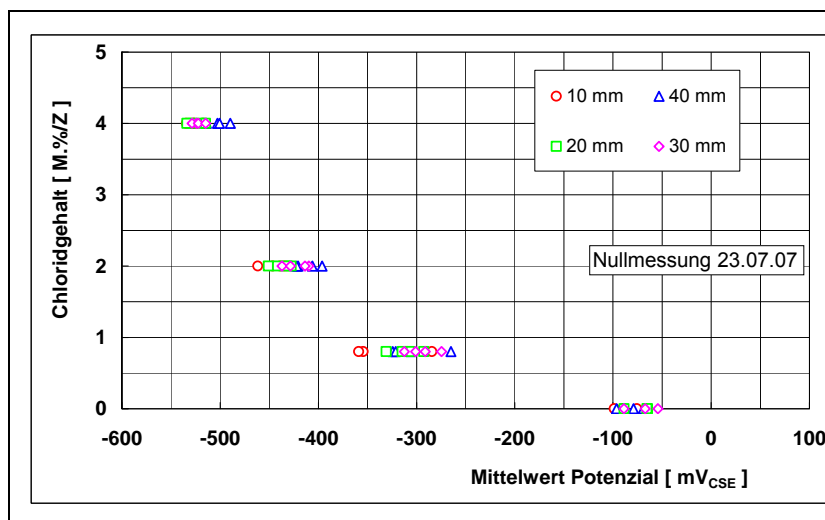


Bild 5.13a:
Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Potenzial. Nullmessung vom 23.7.2007.

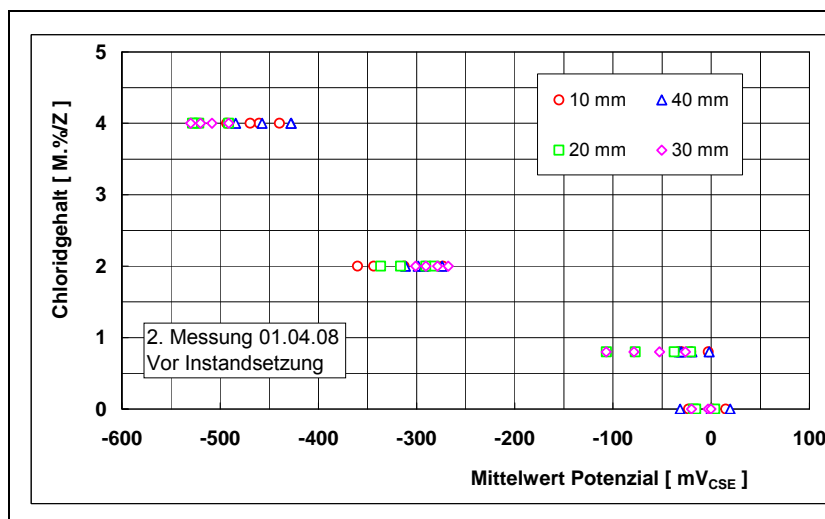


Bild 5.13b:
Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Potenzial. Messung vom 1.4.2008, vor der Instandsetzung.

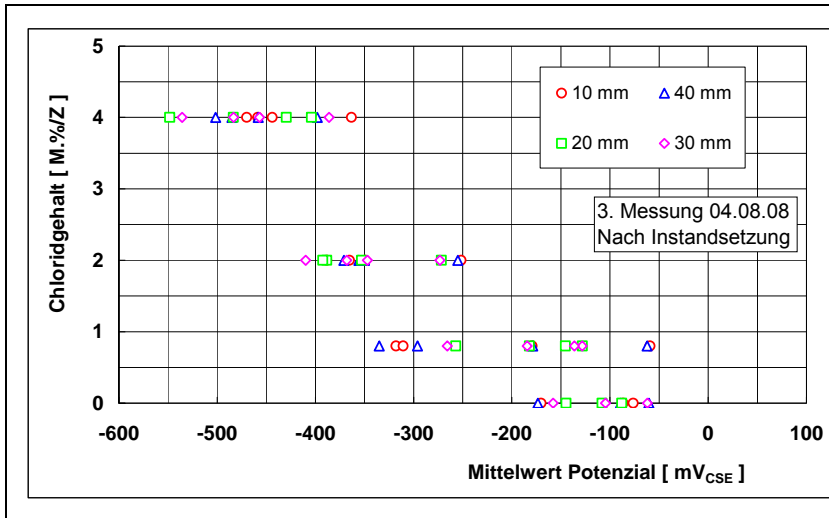


Bild 5.13c:

Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Potenzial. Messung vom 4.8.2008, nach der Instandsetzung vom Juni/Juli 2008.

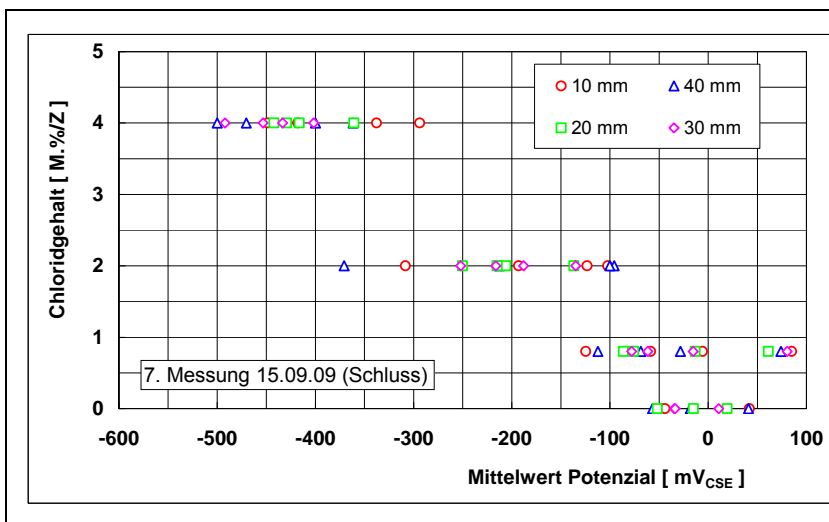


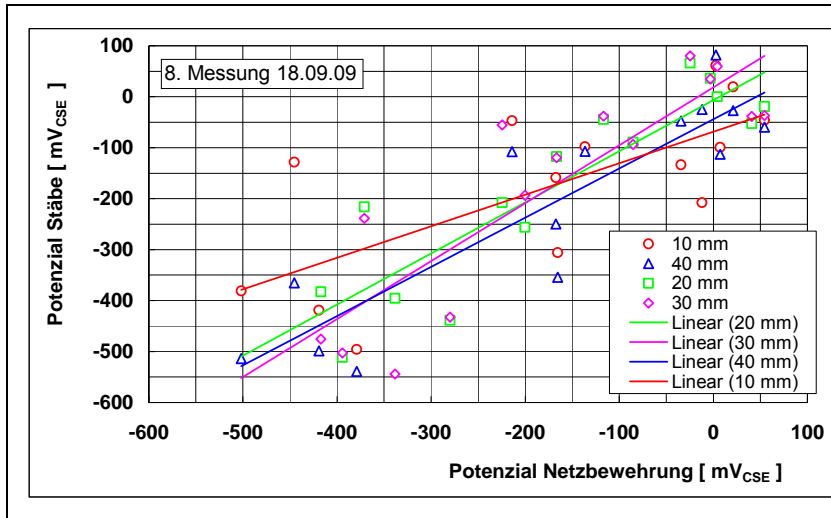
Bild 5.13d:

Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Potenzial. Schlussmessung vom 15.9.2009.

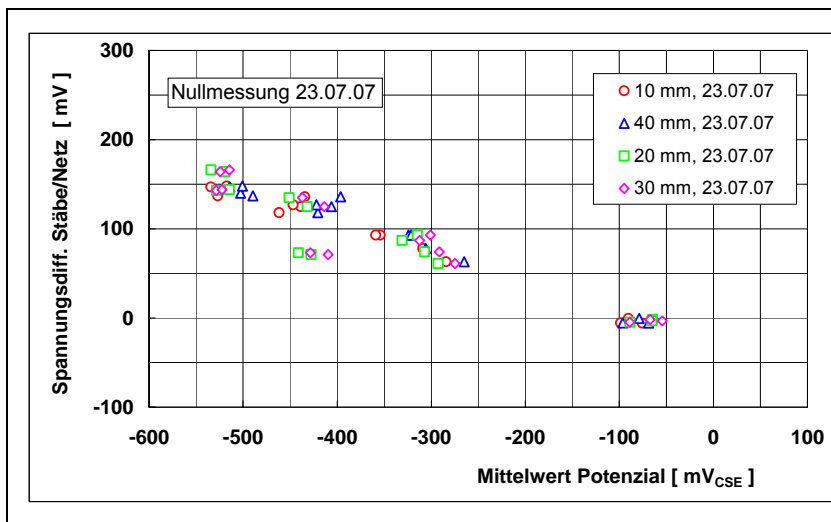
5.3.2 Potenzialdifferenz Betonstahl / nichtrostende Bewehrung

Bei den Messungen wurde festgestellt, dass die Korrosionsströme bzw. die Korrosionsabträge bei den Referenz- und der instand gesetzten Prüfkörpern im Verlauf der Zeit deutlich abnahmen (siehe **Kap. 5.3.4**). Die Ursache dafür ist teilweise der kathodischen Polarisierung der nichtrostenden Netzbewehrung (Kathode) zuzuschreiben (**Bild 5.14**). Damit wurde die Spannungsdifferenz zwischen den Stäben und der Netzbewehrung (**Bild 5.15**), d.h. die treibende Kraft für die Korrosion der Stäbe teilweise erheblich kleiner. Zudem hat der elektrische Betonwiderstand mit der Zeit zugenommen (siehe **Kap. 5.3.3**). Dies und die Bildung von Rostprodukten auf der Bewehrung die Abtragsrate führten zu einer Reduktion der Korrosionsströme. Weiterhin änderten sich bei den instand gesetzten Prüfkörpern die Chloridprofile (siehe **Kap. 5.4**).

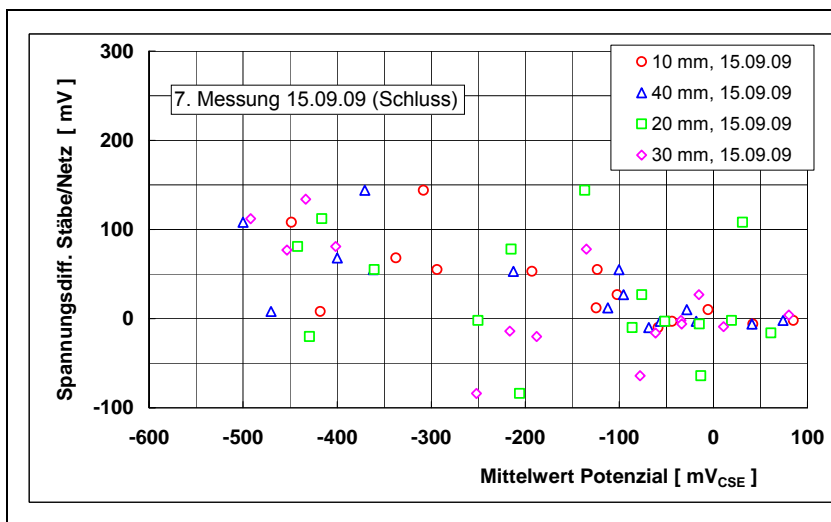
Die Ursache für die starke Polarisierung der nichtrostenden Netzbewehrung ist einerseits auf das kleine Flächenverhältnis Kathode/Anode (siehe **Kapitel 5.1**) und auf die leichte Polarisierung des nichtrostenden Stahls zurückzuführen.



*Bild 5.14:
Zusammenhang zwischen dem Potential der Stäbe und jenem der nichtrostenden Netzbewehrung.*



*Bild 5.15a:
Zusammenhang zwischen der Spannungsdifferenz zwischen den Stäben und der nichtrostenden Netzbewehrung und dem Mittelwert des Potentials der Stäbe. Nullmessung vom 23.7.2007.*



*Bild 5.15b:
Wie Bild 5.15a, Schlussmessung vom 15.9.2009.*

5.3.3 Spezifischer elektrischer Betonwiderstand

Aus den gemessenen Widerständen zwischen den einzelnen Stäben und der Netzbewehrung (in Ω) wurde der spezifische elektrische Betonwiderstand (in Ωm) mit der **Gleichung 5.1** berechnet. Diese Gleichung wird zur Berechnung des Ausbreitungswiderstandes eines eingebetteten Stabes benutzt.

$$\rho_c = R_\Omega \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \frac{l^2}{t \cdot d}}$$

Gleichung 5.1

Mit:

- ρ_c spezifischer elektrischer Betonwiderstand, Ωm
 R_Ω gemessener elektrischer Betonwiderstand, Ω
 l Länge des eingebetteten Stabes, m
 t Überdeckung, Einbettiefe des Stahlstabes, m
 d Durchmesser des Stahlstabes, m

Der zeitliche Verlauf der spezifischen elektrischen Betonwiderstände ist in den **Bildern 5.16a bis d** dargestellt. In den ersten Monaten nimmt der Widerstand deutlich zu (zunehmende Hydratation). Gut ersichtlich ist der starke Einfluss des Chloridgehalts. Nach der Instandsetzung (Erhöhung der Überdeckung um 20 mm) nimmt der Betonwiderstand in allen Tiefen zu, am stärksten jedoch bei den Prüfkörpern mit 0% und 0.8% Chlorid. Erwartungsgemäss werden wegen den tiefen Temperaturen die Maximalwerte in den Wintermonaten erreicht. Die Unterschiede zwischen den Systemen A, B und C sind gering. Eine Wirkung der hydrophobierenden Eigenschaft des silan-haltigen Systems C ist nicht erkennbar.

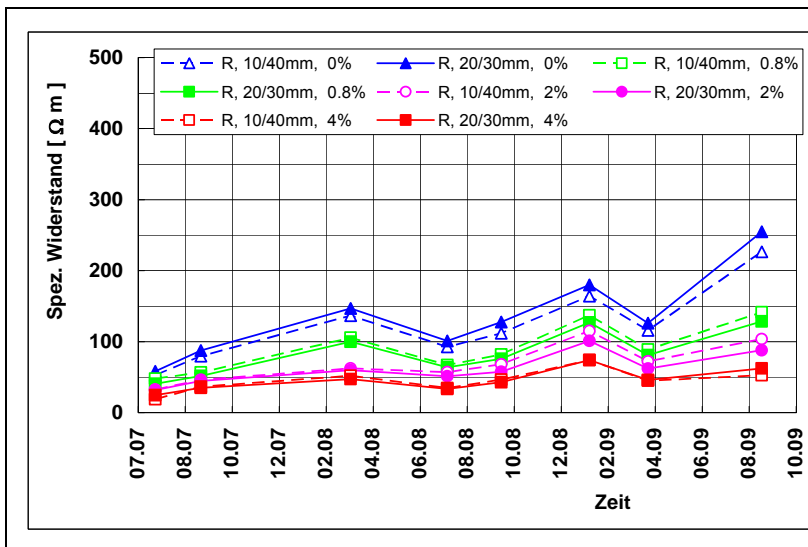


Bild 5.16a:

Zeitlicher Verlauf des spezifischen elektrischen Betonwiderstandes bei den Referenzprüfkörpern.

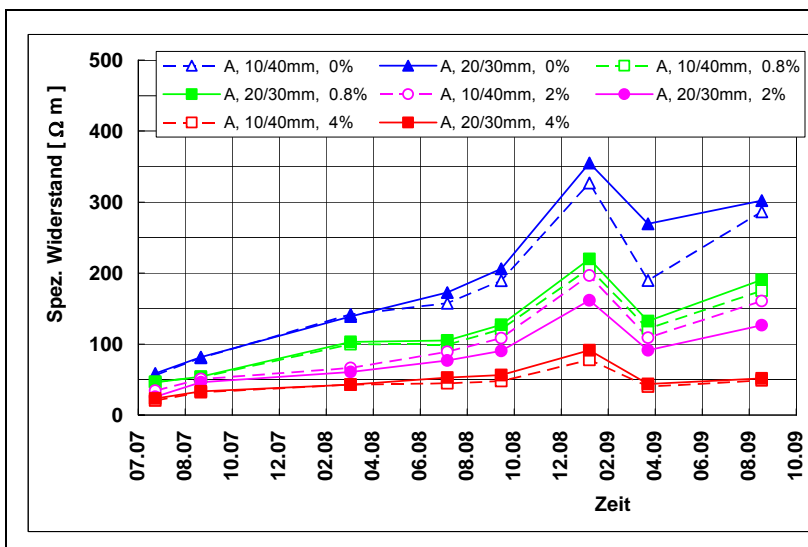
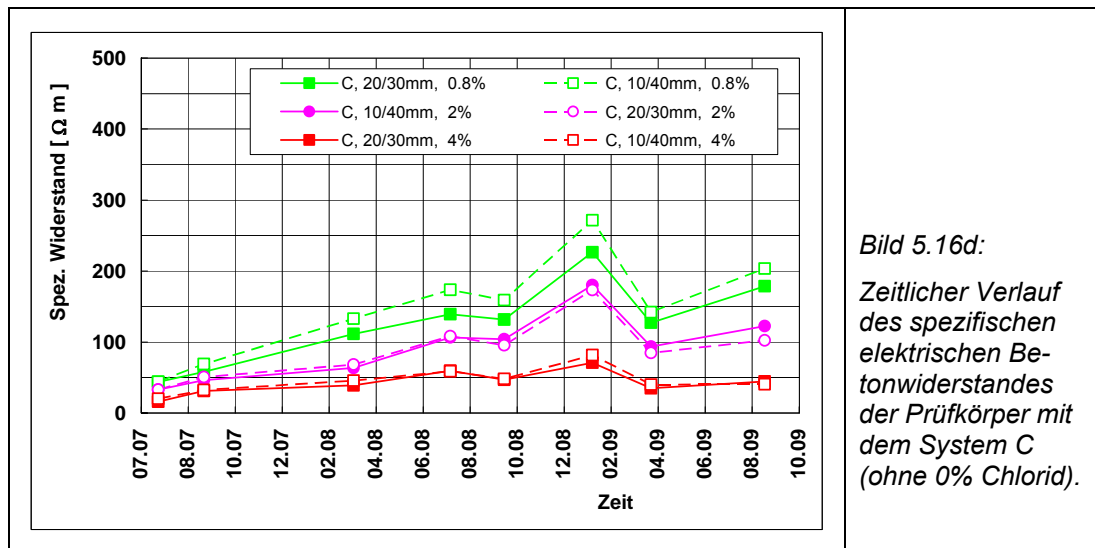
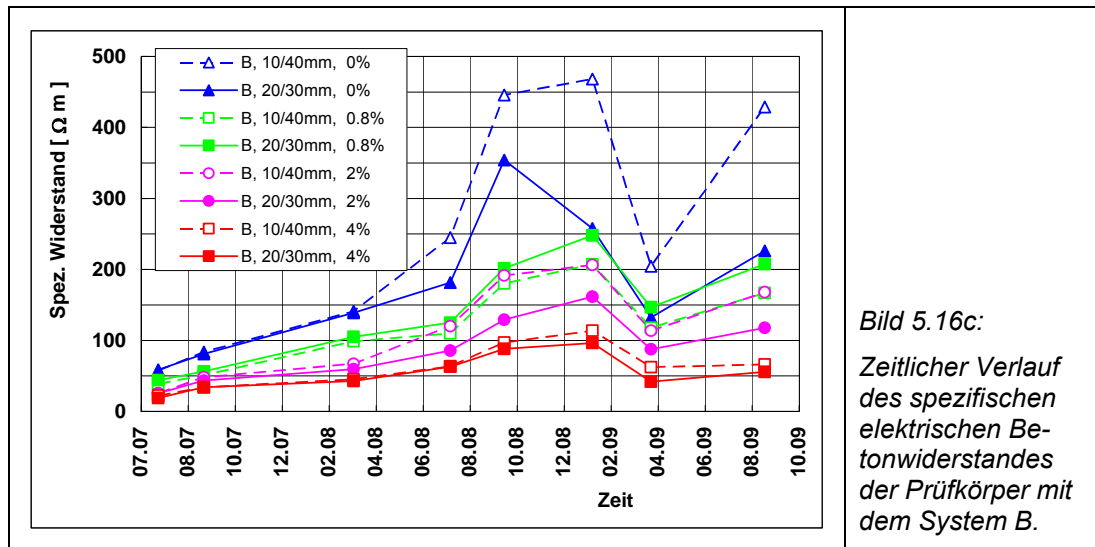


Bild 5.16b:

Zeitlicher Verlauf des spezifischen elektrischen Betonwiderstandes der Prüfkörper mit dem System A.



Zur Kontrolle der Messungen und Berechnungen wurden verschiedene Korrelationen geprüft.

In **Bild 5.17** ist der aus den Werten der Einzelstäbe (Parallelschaltung) berechnete Gesamtwiderstand gegen den mit allen Stäben gemessenen Gesamtwiderstand dargestellt. Abgesehen von einzelnen Werten stimmen die aus den gemessenen Einzelstabwiderständen berechneten mit den gemessenen Gesamtwiderständen gut überein.

Bild 5.18 zeigt weiter den spezifischen elektrischen Betonwiderstand, berechnet aus dem Gesamtwiderstand, in Abhängigkeit von dem mit den Werten der Einzelstäbe berechneten Mittelwert des spezifischen Betonwiderstandes. In den **Bildern 5.19 a und b** sind die spezifischen Widerstände der Einzelstäbe (a, b, c) gegen den Mittelwert aufgetragen.

Ganz generell zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Insgesamt gibt es nur einzelne „Ausreisser“. Daraus darf geschlossen werden, dass Messung und Berechnung korrekt sind.

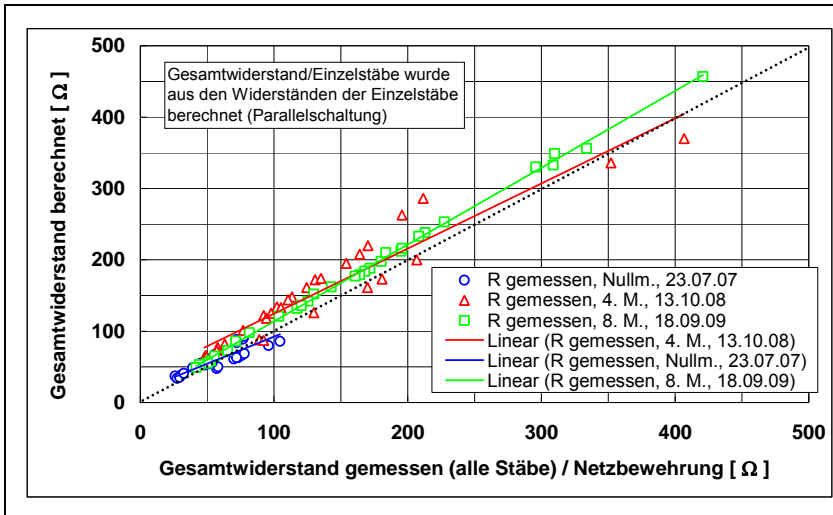


Bild 5.17: Gesamtwiderstand, berechnet aus den Werten der Einzelstäbe (Parallelschaltung), vs. Gesamtwiderstand gemessen mit allen Stäben.

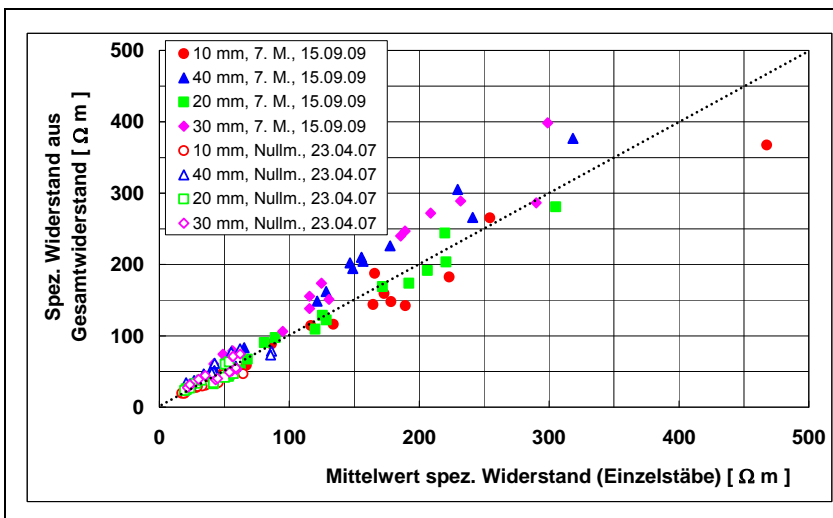


Bild 5.18: Spez. elektrischer Betonwiderstand, berechnet aus Gesamtwiderstand vs. Mittelwert des spez. Betonwiderstandes der Einzelstäbe (23.4.2007 und 15.09.2009).

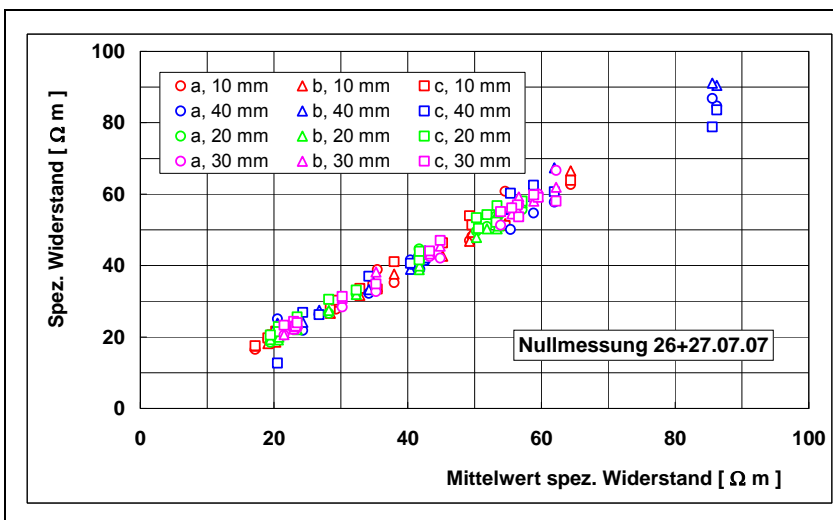
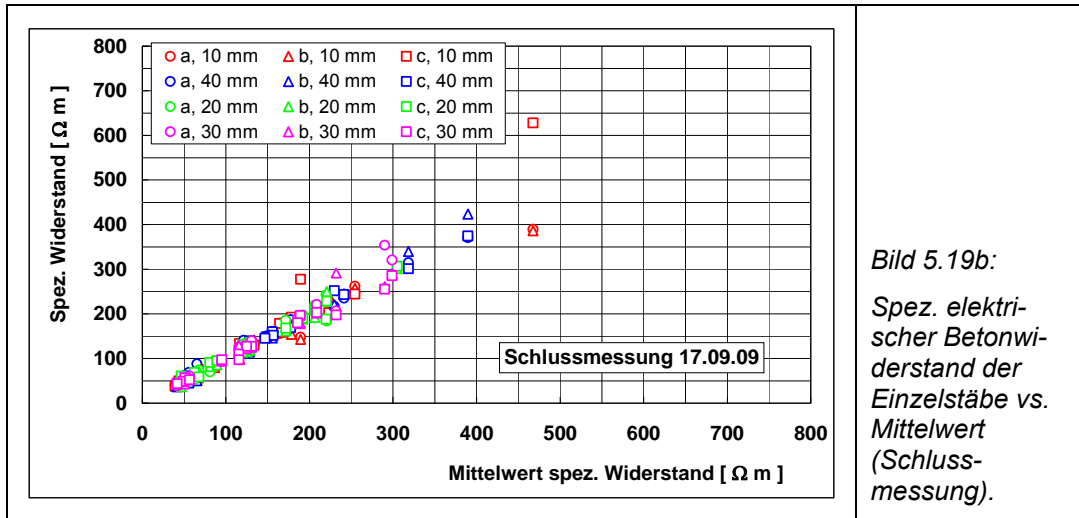
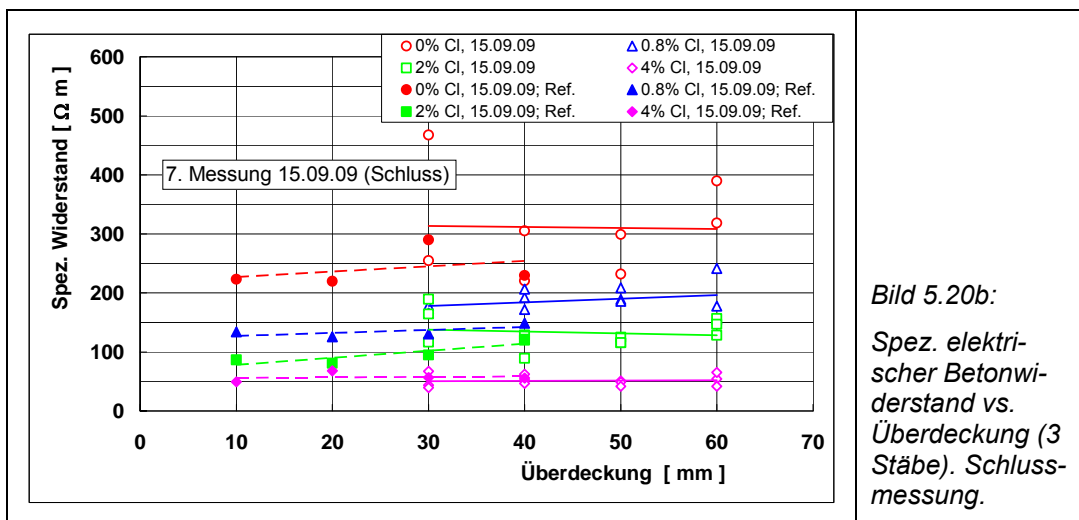
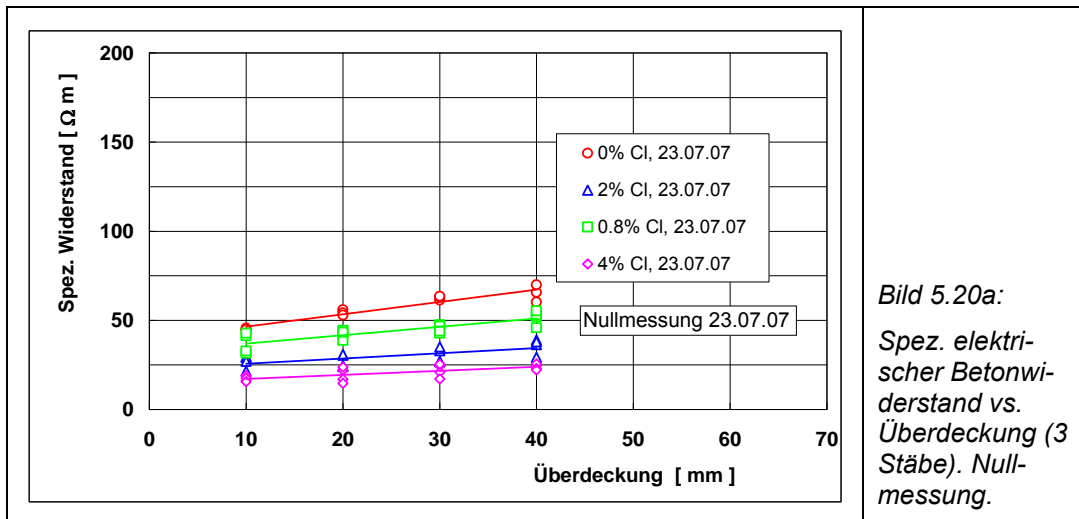


Bild 5.19a: Spez. elektrischer Betonwiderstand der Einzelstäbe vs. Mittelwert (Nullmessung).



Der spezifische elektrische Betonwiderstand wird nur wenig von der Überdeckung beeinflusst (**Bild 5.20**). Bei der Nullmessung ist dies noch etwas deutlicher erkennbar als bei der Schlussmessung. Dabei nimmt der Einfluss mit zunehmendem Chloridgehalt eher ab.



Aus den **Bildern 5.21a und b** ist ersichtlich, dass der spezifische elektrische Betonwiderstand mit zunehmendem Chloridgehalt der Prüfkörper stark abnimmt, mit zunehmendem

Alter hingegen stark zunimmt. Die Zunahme ist beim chloridfreien Beton deutlich höher (Faktor 4 bis 5) als beim stark chloridhaltigen Beton (Faktor 2.5).

Junger chloridfreier Beton hat damit etwa einen 2.5- bis 3-fach höheren Widerstand als der Beton mit viel Chlorid. Nach zwei Jahren vergrößert sich der Unterschied und beträgt bei Versuchsende etwa das 6-fache. Die Überdeckung hat nur zu Beginn noch einen gewissen Einfluss, verschwindet dann aber mit der Zeit praktisch vollständig.

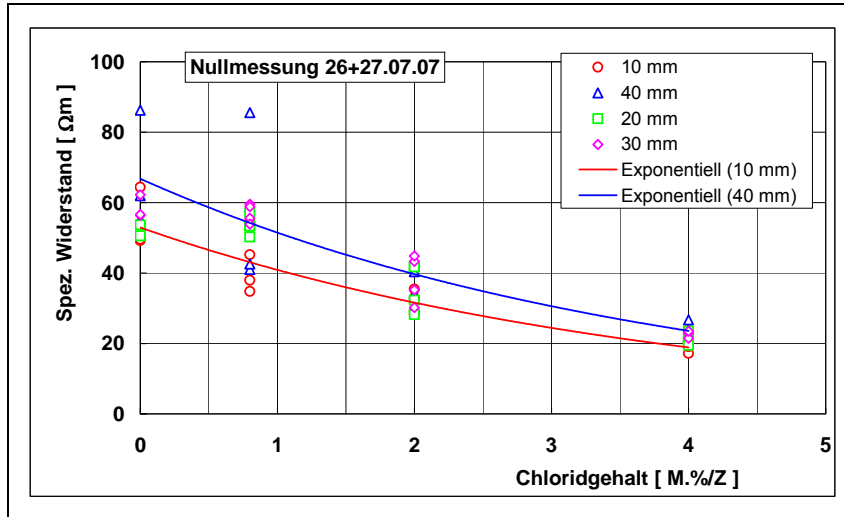


Bild 5.21a:

Spez. elektrischer Betonwiderstand in Abhängigkeit vom Chloridgehalt (Nullmessung).

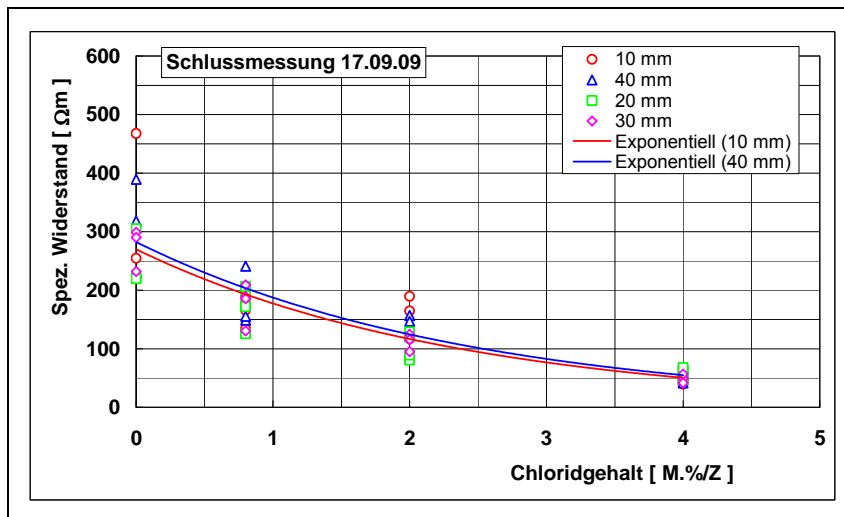


Bild 5.21b:

Spez. elektrischer Betonwiderstand in Abhängigkeit vom Chloridgehalt (Schlussmessung).

5.3.4 Korrosionsabtragsrate (Korrosionsgeschwindigkeit)

Aus dem zwischen den einzelnen Bewehrungsstäben und der nichtrostender Netzbewehrung fließenden Strom wurde die Korrosionsabtragsrate (kurz Abtrag) berechnet. Es ist zu beachten, dass für die Berechnung des Abtrags die gesamte freie Staboberfläche (inkl. Stirnfläche der Stäbe) verwendet wurde. Wegen des inhomogenen Angriffs müssen die berechneten Werte mit Vorsicht betrachtet werden.

In den **Bilder 5.22a und b** ist der Abtrag, berechnet aus Strommessung sofort und nach 1 Minute nach der Herstellung des Kurzschlusses bzw. Öffnen der Verbindung zur Netzbewehrung gegen das Potenzial für die Schlussmessung aufgetragen. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass die Messung „sofort nach Kurzschluss“ in der Regel leicht höhere Werte als jene nach 1 Minute gibt: Verhältnis „sofort/1 Minute“ bei der Messung am 1.4.2008: 0.75 bis 1.75 und am 17.9.2009: 0.98 bis 1.23.

Die teilweise negativen Abträge bedeuten, dass der gemessene Bewehrungsstab als Kathode wirkt, d.h. nicht korrodiert bzw. dass sein Korrosionspotenzial positiver ist als das Mischpotenzial der übrigen Bewehrungsstäbe und der Netzbewehrung zusammen.

Aus dem Bild geht weiter hervor, dass sowohl die Einzelwerte wie auch die Mittelwerte der Stäbe in einer bestimmten Tiefe stark streuen. Dies macht es schwierig, Zusammenhänge zu erkennen. Deshalb wurden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, für die weitere Auswertung generell die nach 1 Minute gemessenen Gesamtstromstärke (alle Einzelstäbe elektrisch verbunden) eines einzelnen Prüfkörpers für die Berechnung des Abtrags verwendet.

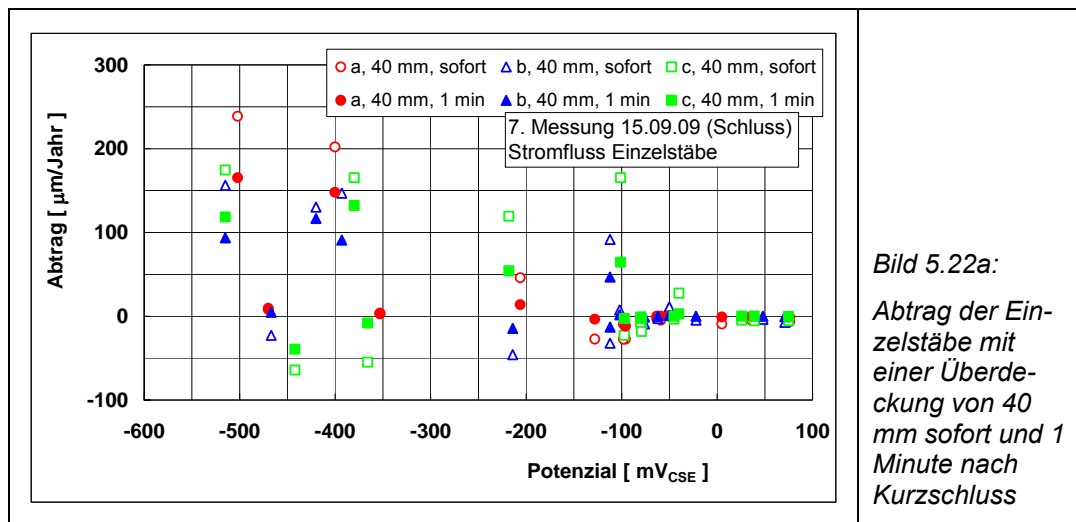


Bild 5.22a:

Abtrag der Einzelstäbe mit einer Überdeckung von 40 mm sofort und 1 Minute nach Kurzschluss

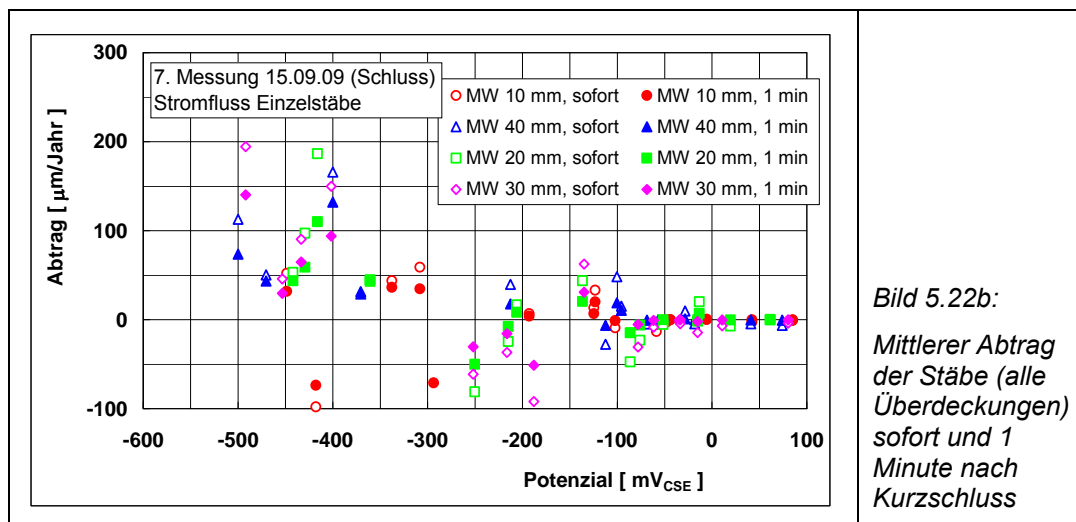


Bild 5.22b:

Mittlerer Abtrag der Stäbe (alle Überdeckungen) sofort und 1 Minute nach Kurzschluss

In den **Bildern 5.23a bis d** ist der Abtrag bei den verschiedenen Prüfkörpern gegen die Zeit aufgetragen, aufgeschlüsselt nach Überdeckung (10/40 und 20/30 mm) und nach Chloridgehalt. Bei allen Prüfkörpern nimmt der Abtrag mit der Zeit deutlich ab. Der Verlauf ist bei den Referenz- und den behandelten Prüfkörpern ähnlich. Der Abtrag der Prüfkörper mit einem Chloridgehalt von 0,8 M. %/Z geht schon wenige Wochen nach der Nullmessung gegen Null und verharrt danach mehrheitlich auf diesem Wert. Im Übrigen treten auch hier einzelne negative Abträge auf. Sie entstehen, wenn die Bewehrungsstäbe ein positiveres Korrosionspotenzial als die Netzbewehrung haben.

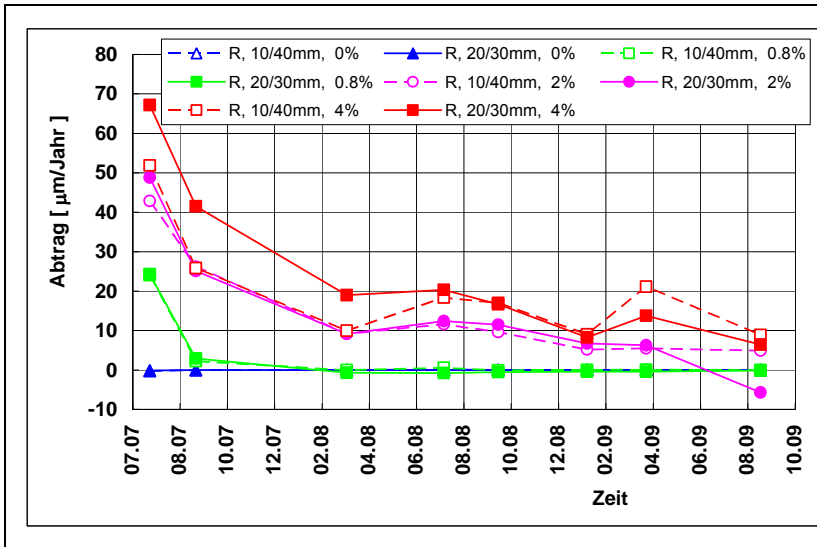


Bild 5.23a:

Mittlerer Abtrag der Stäbe (Überdeckung 10/40 und 20/30 mm) im Referenzprüfkörper R über die Zeit.

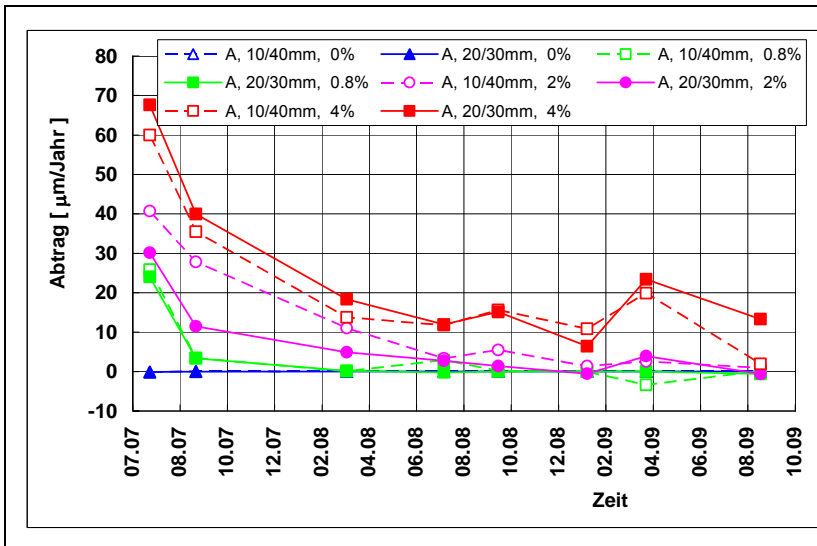


Bild 5.23b:

Mittlerer Abtrag der Stäbe (Überdeckung 10/40 und 20/30 mm) im Prüfkörper A über die Zeit.

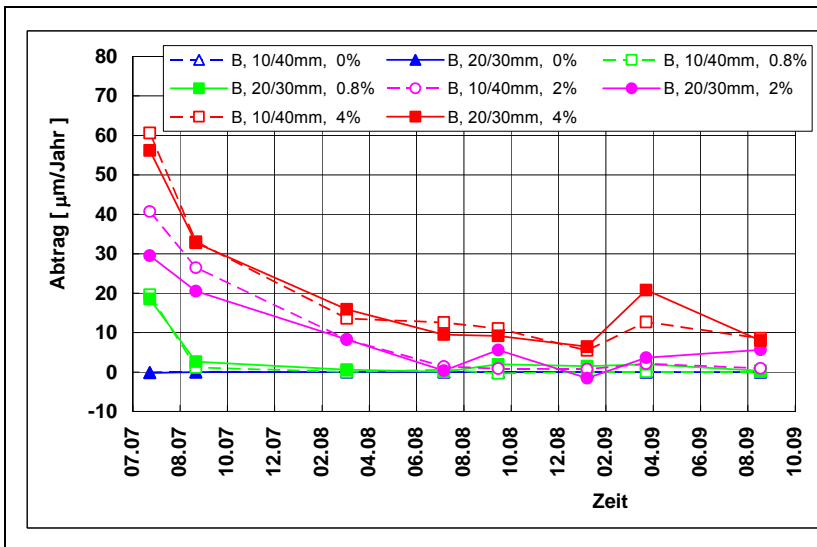
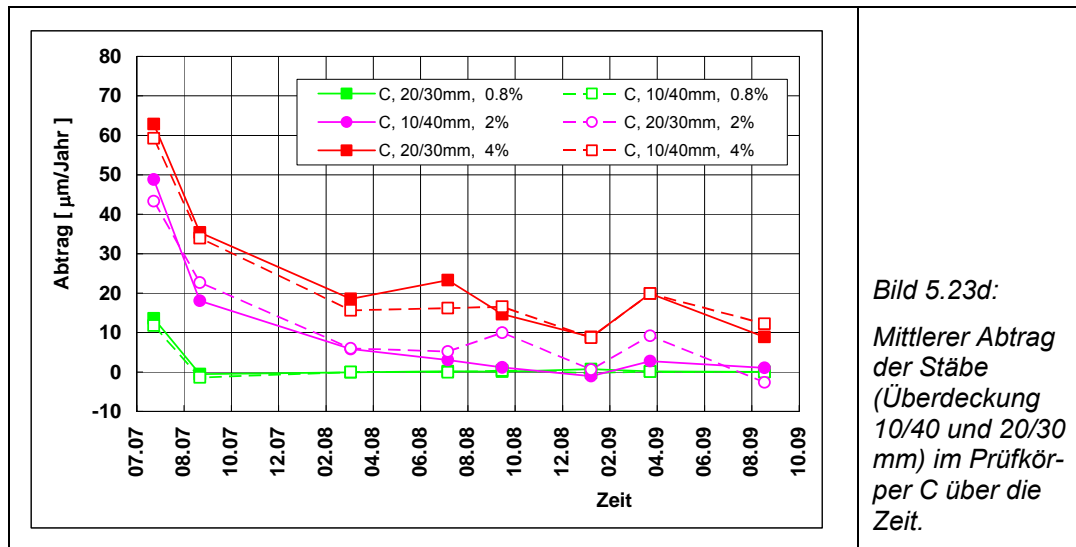
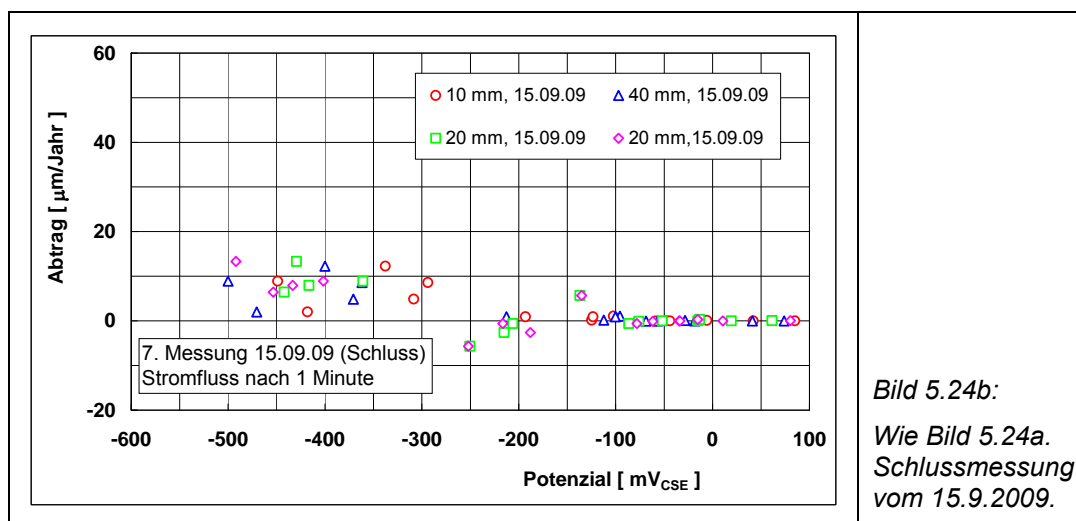
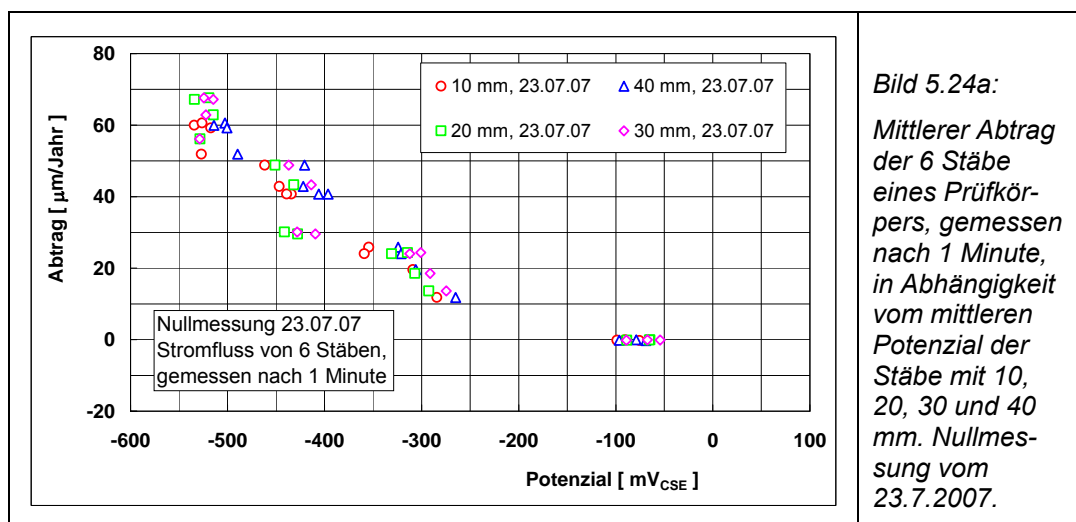


Bild 5.23c:

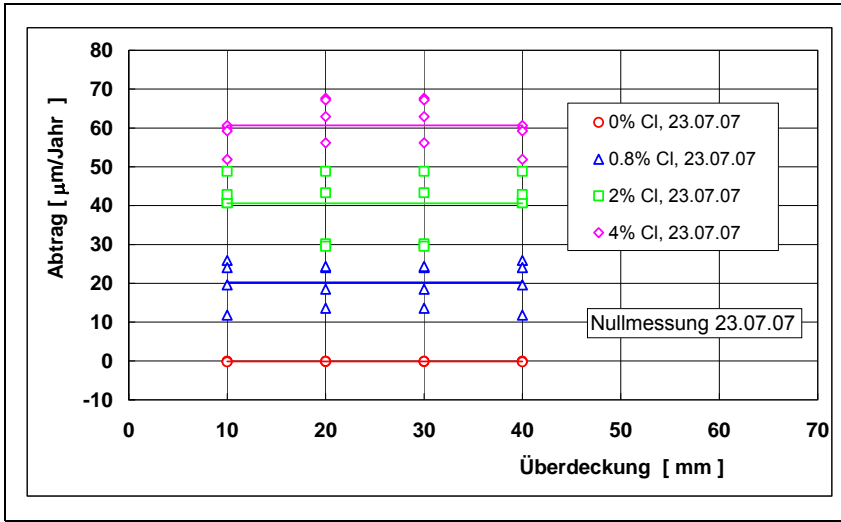
Mittlerer Abtrag der Stäbe (Überdeckung 10/40 und 20/30 mm) im Prüfkörper B über die Zeit.



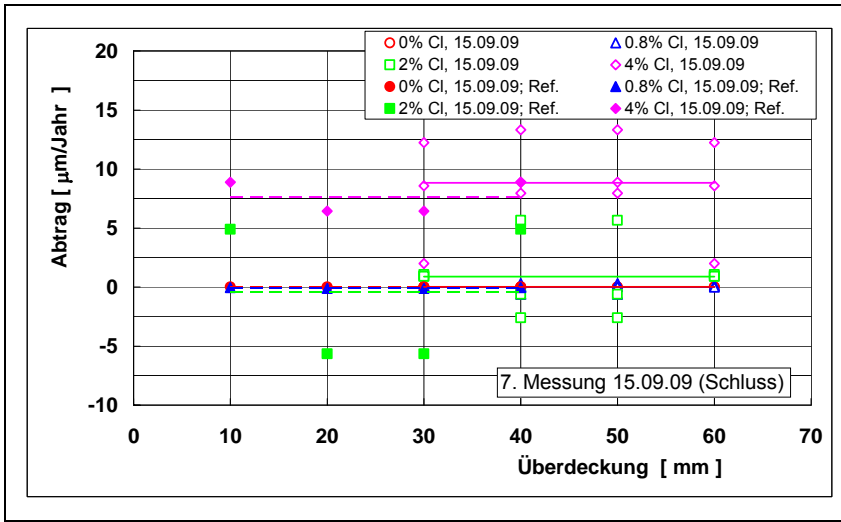
Die folgenden Bilder zeigen den aus allen 6 Stäben eines einzelnen Probekörpers berechneten mittleren Abtrag in Abhängigkeit vom Mittelwert des Potentials der je drei Stäbe mit gleicher Überdeckung. In **Bild 5.24a** sind die Ergebnisse der Nullmessung, in **Bild 5.24b** jene der Schlussmessung dargestellt. Auch hier ist die starke Abnahme des Abtrags mit der Zeit zu beobachten.



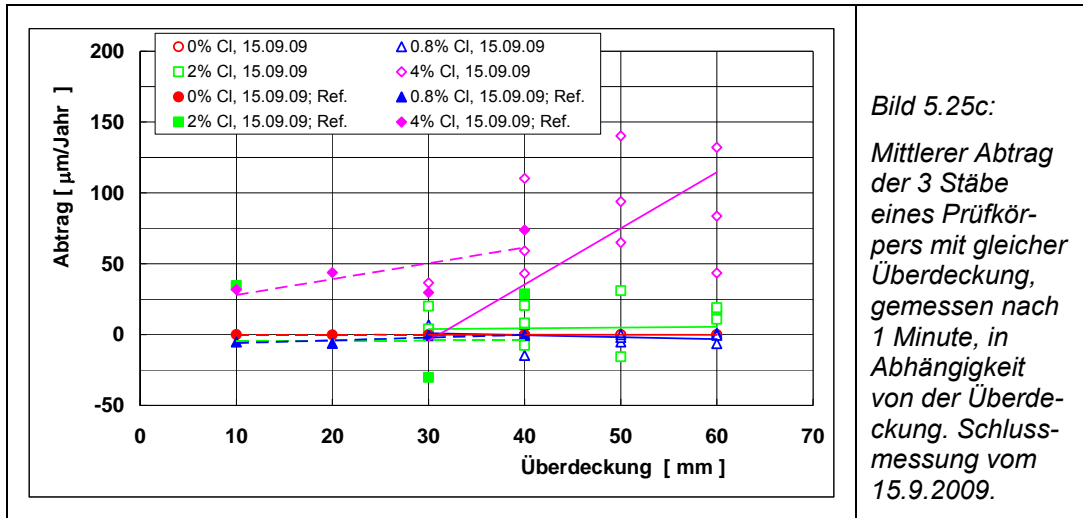
Die Überdeckung hat keinen grossen Einfluss auf den mittleren Abtrag, wie aus den **Bildern 5.25a bis c** hervorgeht. Betrachtet man nur die 3 Stäbe in einem Prüfkörper mit gleicher Überdeckung, so ist ein Einfluss der Überdeckung bei den instand gesetzten Prüfkörpern mit einem Chloridgehalt von 4 M.%/Z erkennbar. Dieser ist bei den Referenzprüfkörpern geringer als bei den instandgesetzten Prüfkörpern (+20 mm Instandsetzungsmörtel). Dieser Einfluss ist zumindest teilweise auf die Abwanderung der Chloridionen vom Beton in den instand gesetzten Mörtel zurückzuführen (siehe **Kap. 5.4**).



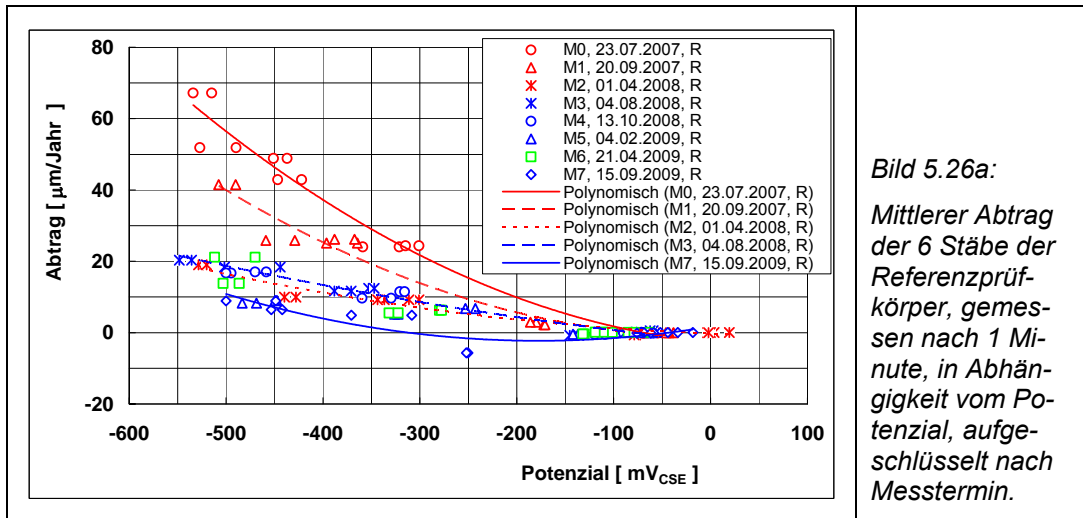
*Bild 5.25a:
Mittlerer Abtrag
der 6 Stäbe
eines Prüfkör-
pers, gemessen
nach 1 Minute,
in Abhängigkeit
von der Überde-
ckung. Nullmes-
sung vom
23.7.2007.*

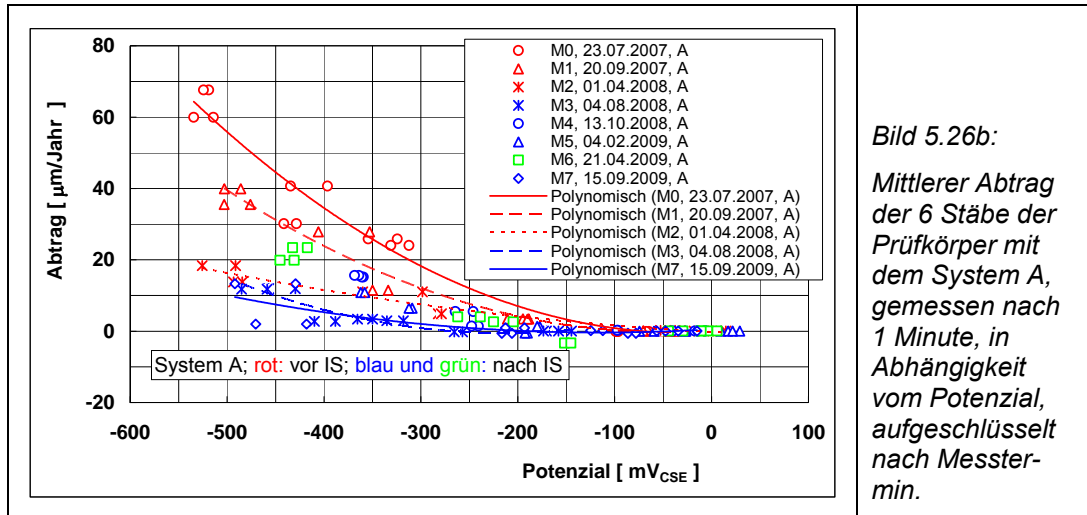


*Bild 5.25b:
Wie Bild 5.25a.
Schlussmessung
vom 15.9.2009.*



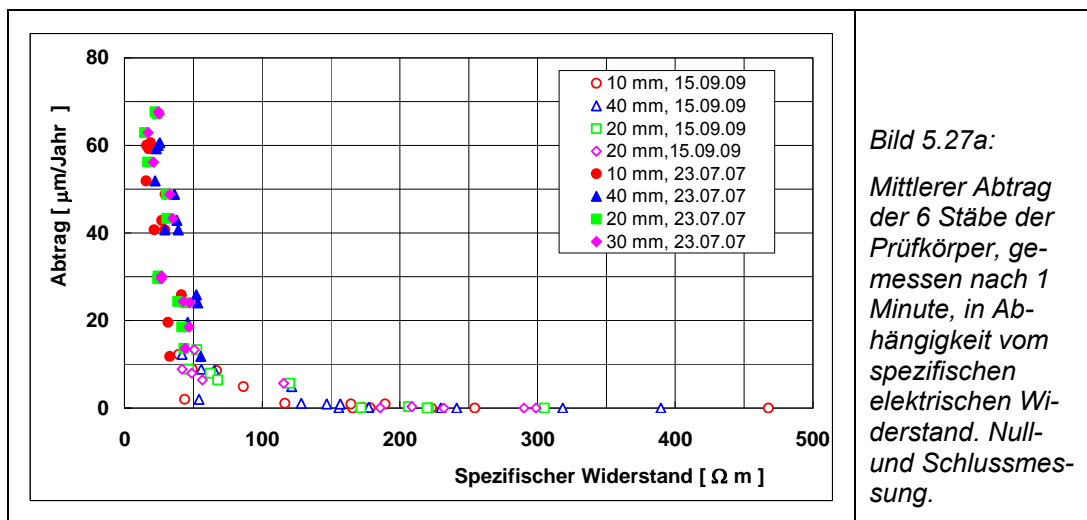
In den **Bildern 5.26a und b** ist der Abtrag gegen das Potenzial für die Referenzprüfkörper R und den Prüfkörpern A (Prüfkörper mit dem System A) bei den verschiedenen Messterminen dargestellt. Es zeigt sich, dass der Abtrag mit der Zeit, trotz ähnlichen Potenzialen, abnimmt. Die Art der Abhängigkeit des Abtrags vom Potenzial bleibt aber grundsätzlich erhalten. Die Ergebnisse der Systeme B und C sind ähnlich wie jene des Systems A. Die Abnahme des Abtrags über die Zeit ist, wie schon erwähnt, auf die Polarisierung der Netzbewehrung, auf den zunehmenden elektrischen Betonwiderstand, auf die Rostbildung auf der Bewehrungsoberfläche und teilweise auf die Abdiffusion der Chloride zurückzuführen (siehe **Kapitel 5.3.2**).





In den **Bildern 5.27a und b** ist der Abtrag in Abhängigkeit vom elektrischen Betonwiderstand gezeigt. Wie schon in anderen Arbeiten gefunden, wurde auch hier eine starke Abnahme des Abtrags mit zunehmendem Widerstand festgestellt. Die Abtragsraten bei bestimmten Betonwiderständen sind aber kleiner als bei anderen Untersuchungen (gleiche Erklärung wie oben).

Aus **Bild 5.28**, in dem der Abtrag in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Betons dargestellt ist, geht hervor, dass die Änderungen von Messtermin zu Messtermin (Änderungen bei der Steigung) und auch die Streuungen relativ gross sind. Bei keinem Messtermin sind aber Messwerte sehr auffällig, die auf eine inhibierende Wirkung nach der Instandsetzung hinweisen würden.



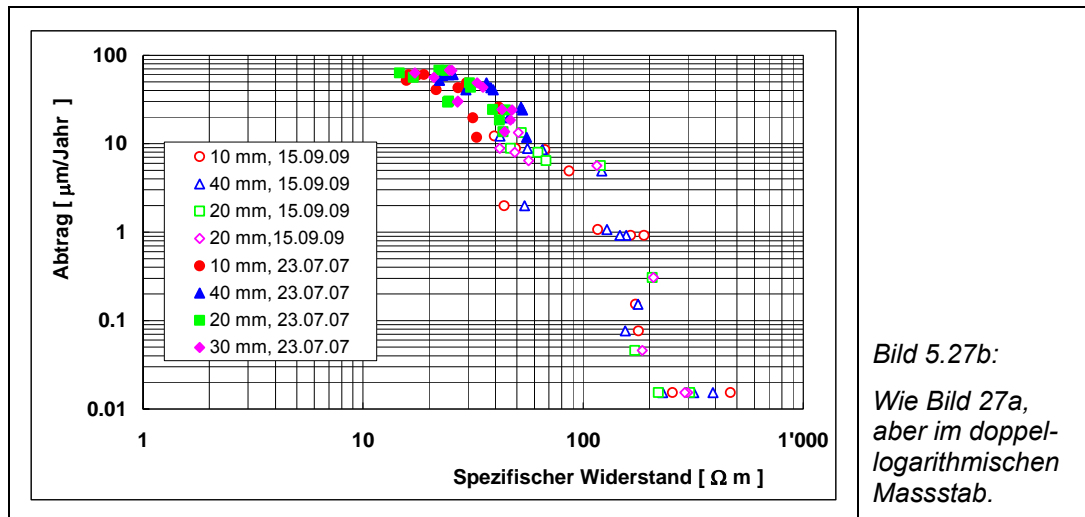


Bild 5.27b:
Wie Bild 27a, aber im doppellogarithmischen Massstab.

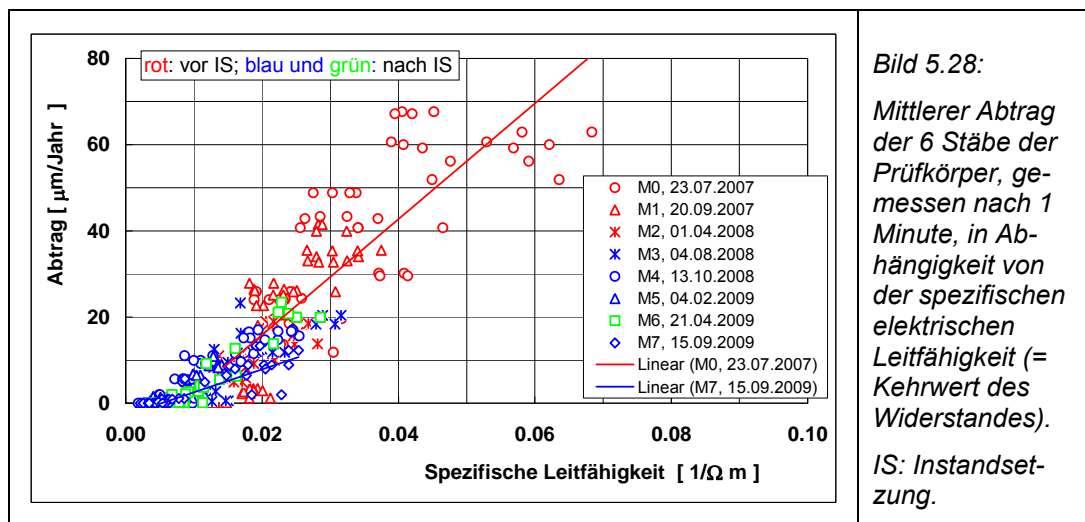


Bild 5.28:
Mittlerer Abtrag der 6 Stäbe der Prüfkörper, gemessen nach 1 Minute, in Abhängigkeit von der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (= Kehrwert des Widerstandes).
IS: Instandsetzung.

Im Vergleich zu den Untersuchungen von [Schiegg 2002] liegen die Werte tiefer (**Bilder 5.29a und b**). Dies ist hauptsächlich auf die Polarisierung der Netzkathode zurückzuführen.

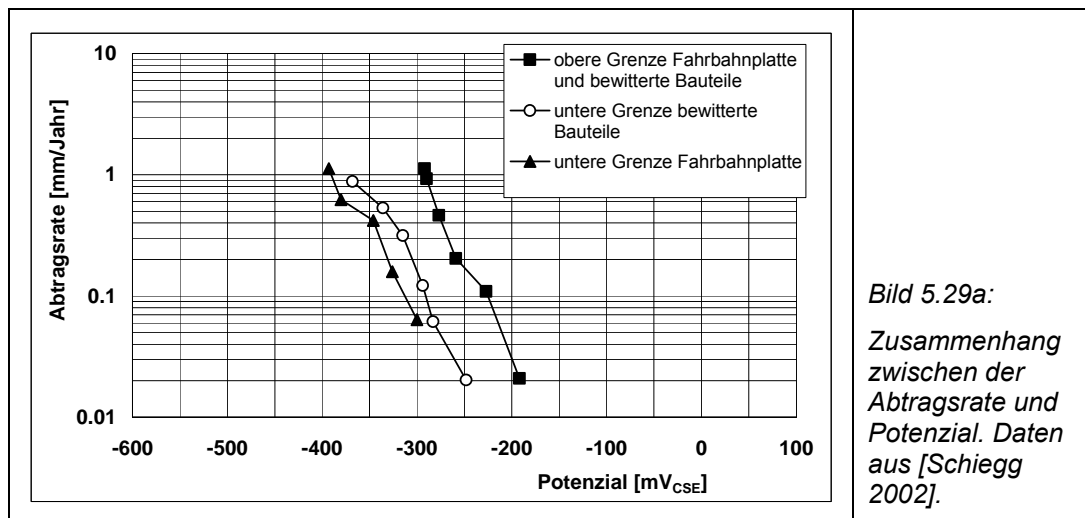
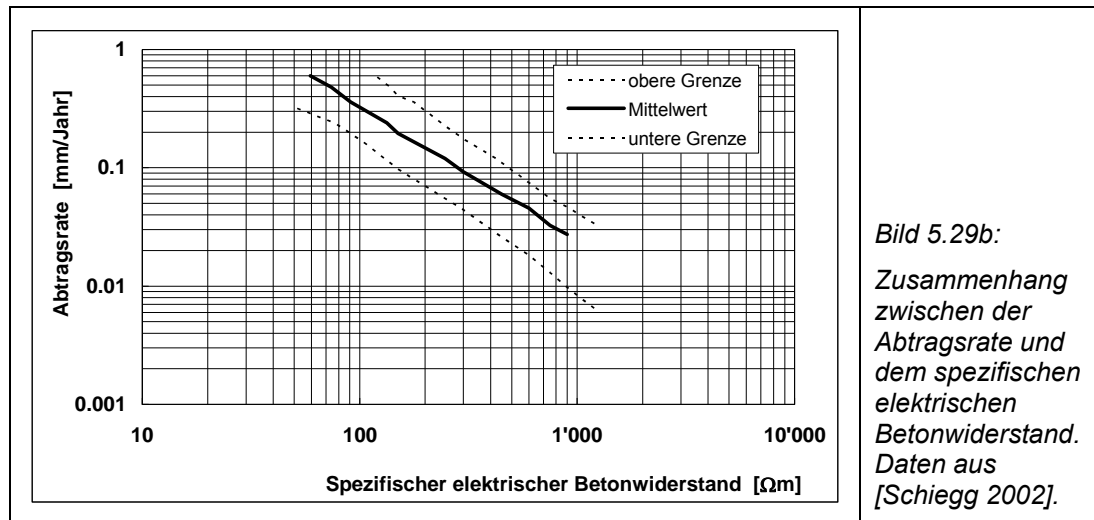


Bild 5.29a:
Zusammenhang zwischen der Abtragsrate und Potenzial. Daten aus [Schiegg 2002].



5.3.5 Vergleichende Betrachtungen der Systeme

In den folgenden Bildern (**Bild 5.30a bis c**) sind Potenzial, spezifischer elektrischer Betonwiderstand und der Abtrag über die Zeit für die verschiedenen Instandsetzungssysteme dargestellt. Folgendes kann daraus entnommen werden:

- Das Potenzial fällt direkt nach der Instandsetzung etwas ab, steigt danach aber an und ist später, abgesehen vom System A, etwa 100 mV positiver als jenes der Referenzprüfkörper. Daraus alleine darf aber noch keine positive Wirkung der Inhibitoren abgeleitet werden.
- Der spezifische elektrische Betonwiderstand ist nach der Instandsetzung deutlich höher als jener der Referenzprüfkörper. Nach längerer Zeit bleibt die Differenz mit etwa 25 Ωm konstant und, absolut betrachtet, gering. Zwischen den Systemen A, B und C sind bei Versuchsende nur noch geringe Unterschiede vorhanden.
- Die Abtragsrate ist bei den behandelten Prüfkörpern direkt nach der Instandsetzung ein wenig tiefer als jene der unbehandelten Referenzprüfkörper. Nach einer gewissen Zeit (ca. 1 Jahr) sind aber zwischen Referenz- und behandelten Prüfkörpern keine Unterschiede mehr auszumachen.
- Die Tatsache, dass bei den behandelten Prüfkörpern das Potenzial am Ende etwas positiver und der spezifische elektrische Betonwiderstand etwas höher, die Abtragsrate aber ähnlich wie bei den Referenzprüfkörpern ist, lässt vermuten, dass die Potenzialverschiebung eher auf einen etwas langsameren Sauerstoffzutritt zur Bewehrung als auf eine (schwache) inhibierende Wirkung der Inhibitoren zurückzuführen ist.
- Zwischen den verschiedenen eingesetzten Systemen sind keine relevanten Unterschiede vorhanden.

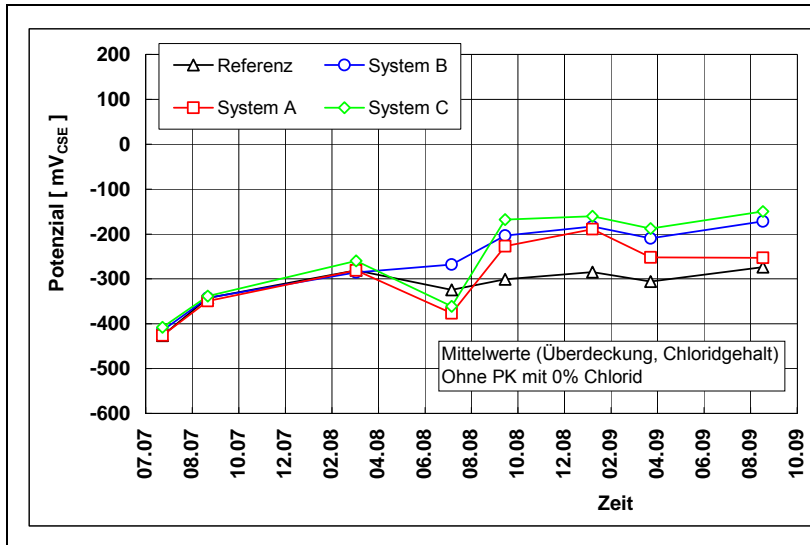


Bild 5.30a:
 Potenzial vs. Zeit (Mittelwerte für die Probekörper mit einem Chloridgehalt von 0.8, 2.0 und 4.0 M.%/Z (ohne PK mit 0 M.%/Z).

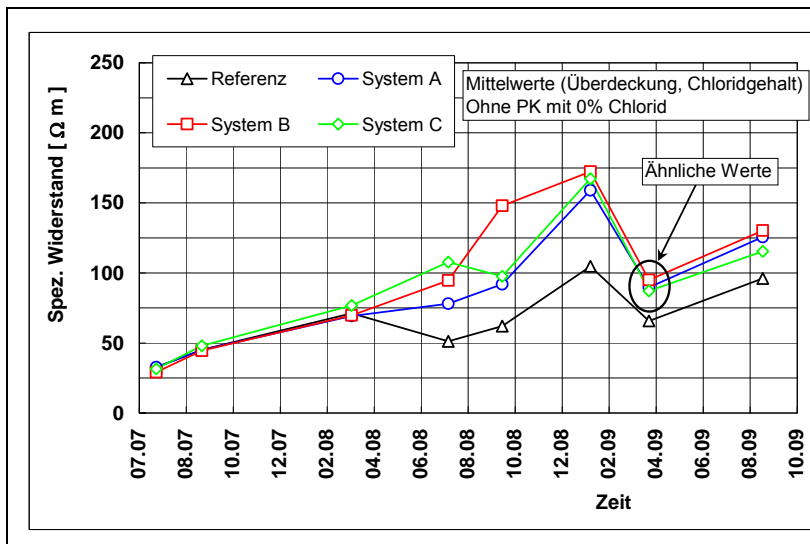


Bild 5.30b:
 Spezifischer elektrischer Betonwiderstand vs. Zeit (Mittelwerte für die Probekörper mit einem Chloridgehalt von 0.8, 2.0 und 4.0 M.%/Z (ohne PK mit 0 M.%/Z).

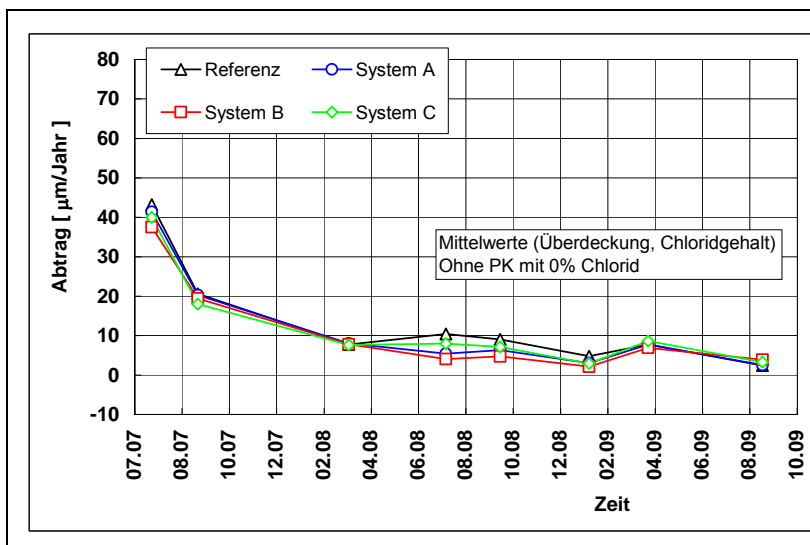


Bild 5.30c:
 Abtrag vs. Zeit (Mittelwerte für die Probekörper mit einem Chloridgehalt von 0.8, 2.0 und 4.0 M.%/Z (ohne PK mit 0 M.%/Z).

In den **Bildern 5.31a und b** ist der mittlere Abtrag (Überdeckung, Chloridgehalt) in Abhängigkeit vom Potenzial bei der Null- und Schlussmessung und in den **Bildern 5.32a und b** die Potenzialabhängigkeit des Abtrags für die verschiedenen Behandlungen ge-

zeigt. Bei negativeren Potentialen sind zwischen den Systemen keine relevanten Unterschiede zu erkennen. Bei positiveren Potentialen gibt es geringfügige Unterschiede (vorab in **Bild 5.32b** erkennbar). Die Gründe für das Auftreten von „negativen“ Abträge wurden bereits in **Kapitel 5.3.4** erläutert.

Auch aus den **Bildern 5.33a und b** (Abtrag vs. Leitfähigkeit) sind keine signifikanten oder relevanten Auswirkungen der Instandsetzungssysteme auf den Zusammenhang zwischen Abtrag und Leitfähigkeit erkennbar.

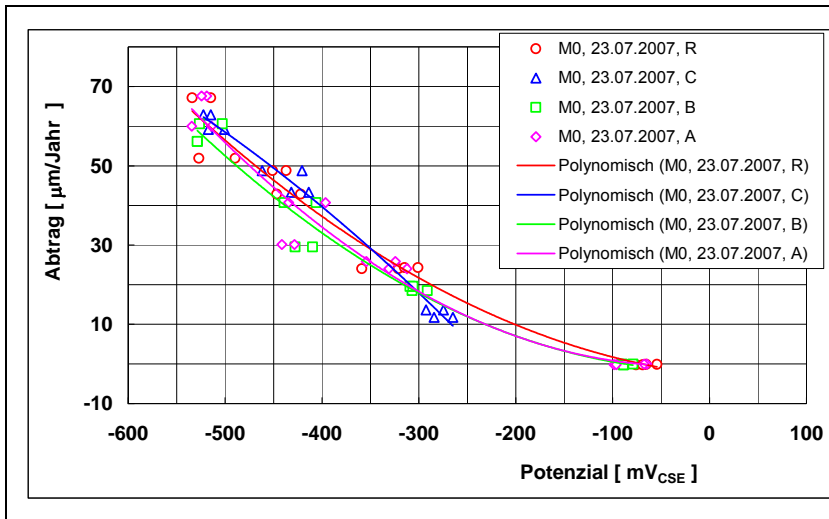


Bild 5.31a:

Abtrag vs. Potential (Mittelwerte). Nullmessung.

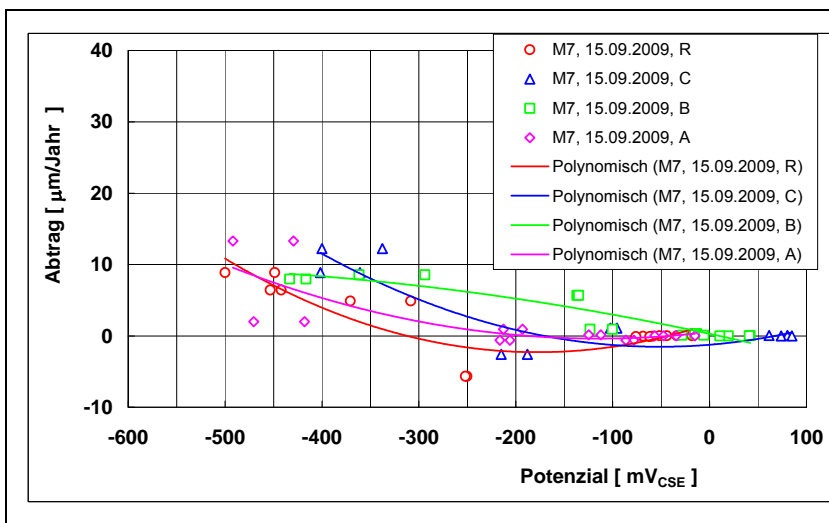


Bild 5.31b:

Abtrag vs. Potential (Mittelwerte für die Probekörper mit einem Chloridgehalt von 0,8, 2,0 und 4,0 M.%/Z. Schlussmessung.

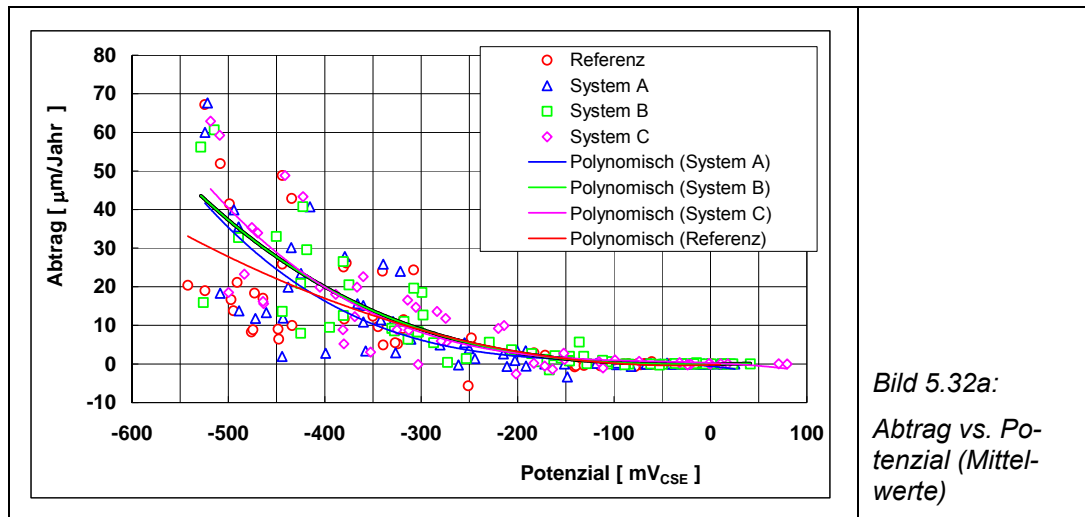


Bild 5.32a:
Abtrag vs. Potenzial (Mittelwerte)

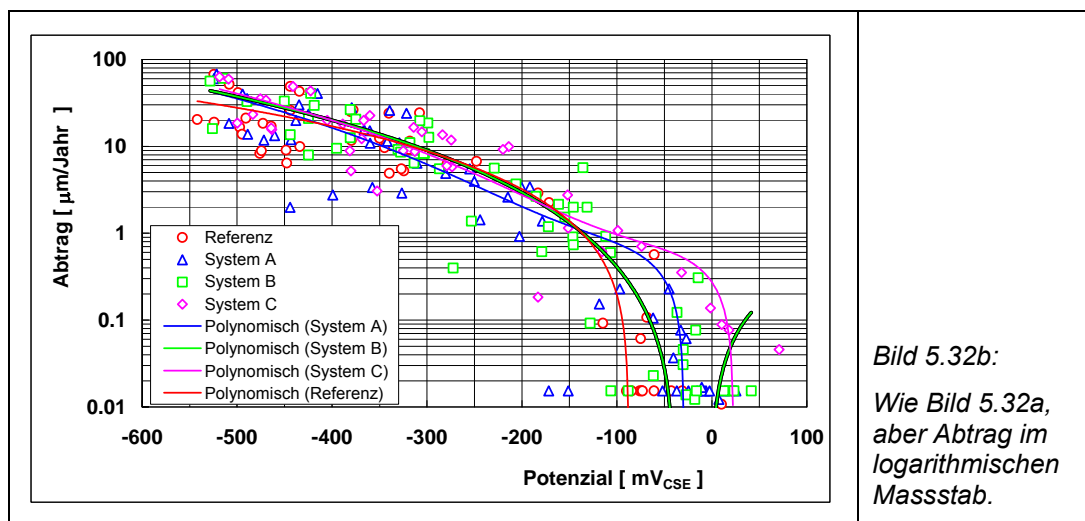


Bild 5.32b:
Wie Bild 5.32a,
aber Abtrag im logarithmischen
Massstab.

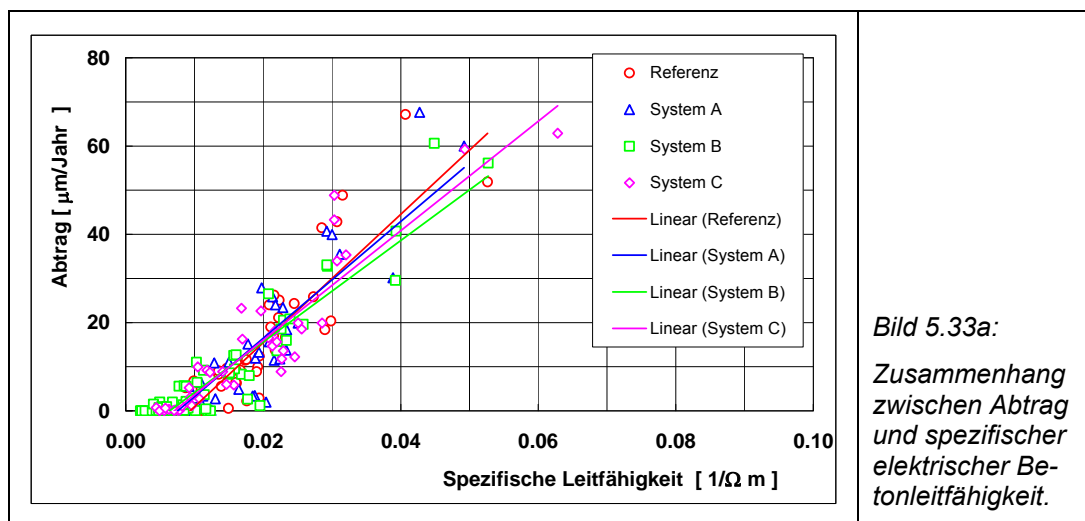
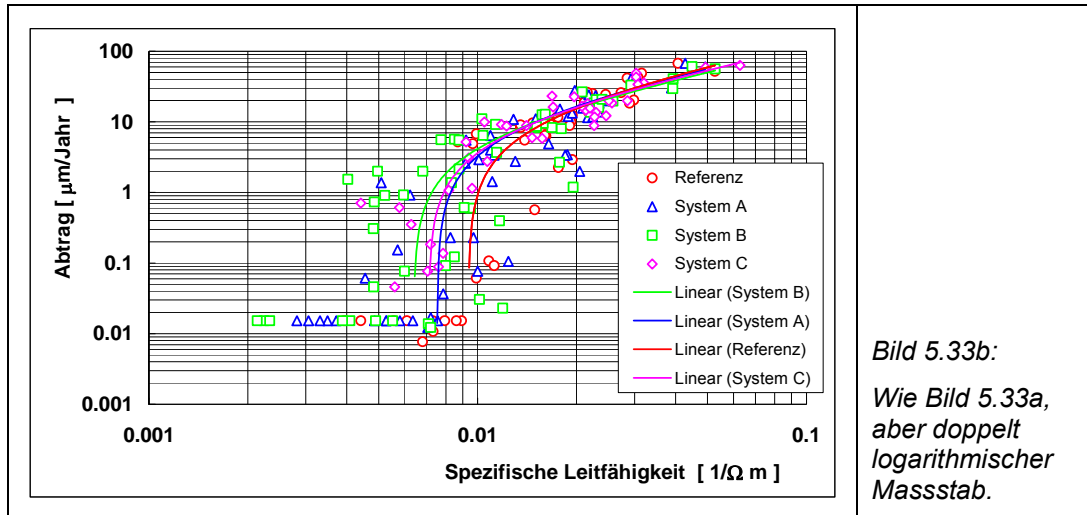


Bild 5.33a:
Zusammenhang
zwischen Abtrag
und spezifischer
elektrischer Be-
tonleitfähigkeit.

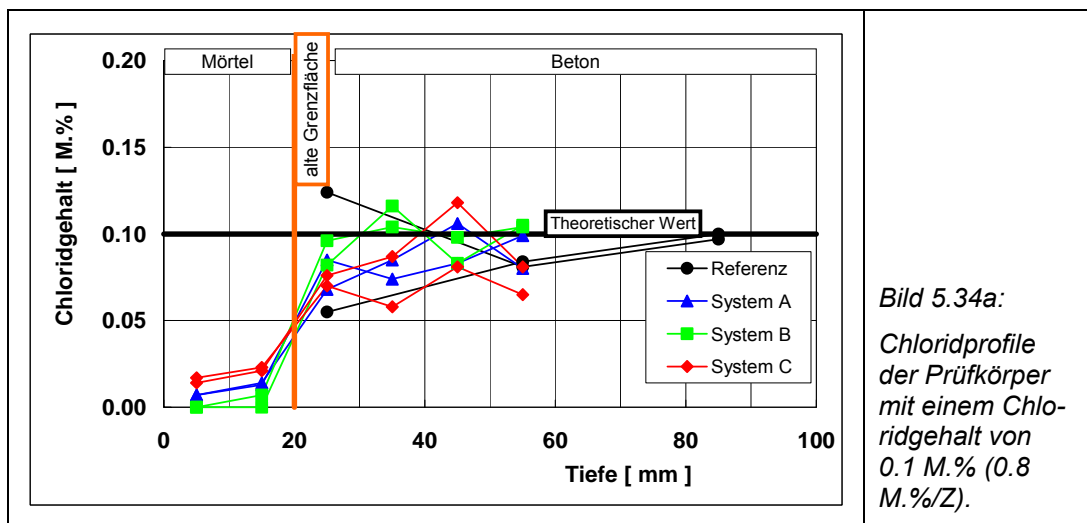


5.4 Chloridprofile

Nach der letzten Korrosionsmessung wurden von den Prüfkörpern je 2 Bohrkern entnommen und der Chloridgehalt gemäss Norm SN EN 14629 [CEN 2007] bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Bild 5.34a bis c** dargestellt. Da der Zementgehalt der eingesetzten Mörtel nicht bekannt ist, werden die Chloridgehalte auf die Gesamtmasse bezogen. Die Ausgangswerte von 0.8, 2.0 und 4.0 M.% bezogen auf den Zementgehalt entsprechen dabei 0.1, 0.25 und 0.5 M.% bezogen auf die Gesamtmasse.

Folgendes ist festzustellen:

- Der Chloridgehalt der Referenzprüfkörper ist, vorab bei den erhöhten Gehalten, an der Oberfläche tiefer als im Kern (Karbonatisierung, Auswaschen). Der Probekörper mit 0.5 M.% (4 M.%/Z) zeigt erst in einer Tiefe von 60 bis 70 mm (im Bild: 80 bis 90 mm) den Ausgangswert.
- Die Chloridprofile zeigen eine deutliche Chloridwanderung in die neue chloridfreie Mörtelschicht an. Je grösser der Chloridgehalt im Altbeton, desto grösser ist der Eintrag in den neuen Mörtel.
- Der Eintrag ist deutlich abhängig vom Instandsetzungssystem (Dichtigkeit des Mörtels). Die stärkste Chloridwanderung ist beim System C zu beobachten, gefolgt vom System A und B.



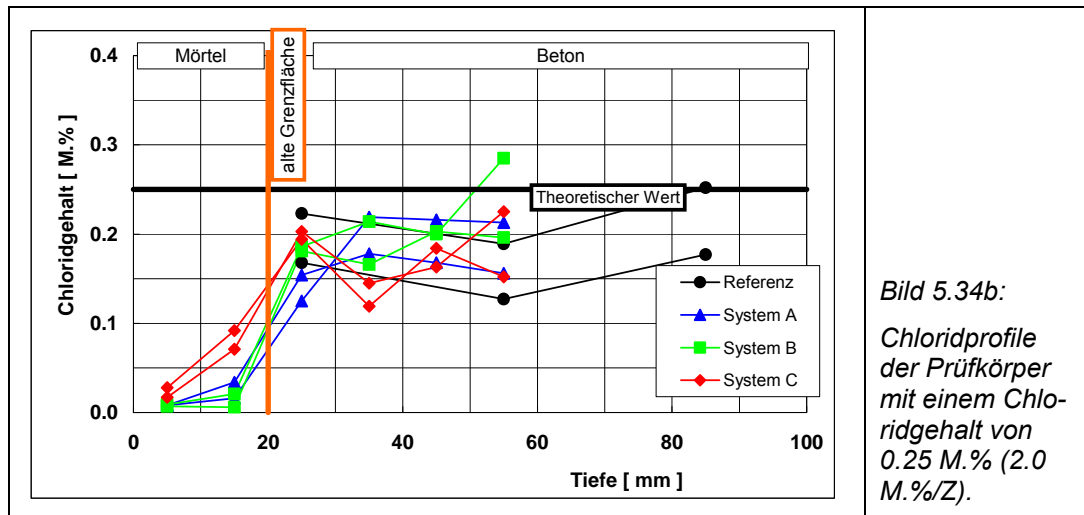


Bild 5.34b:
Chloridprofile
der Prüfkörper
mit einem Chloridgehalt von
0.25 M.% (2.0
M.%/Z).

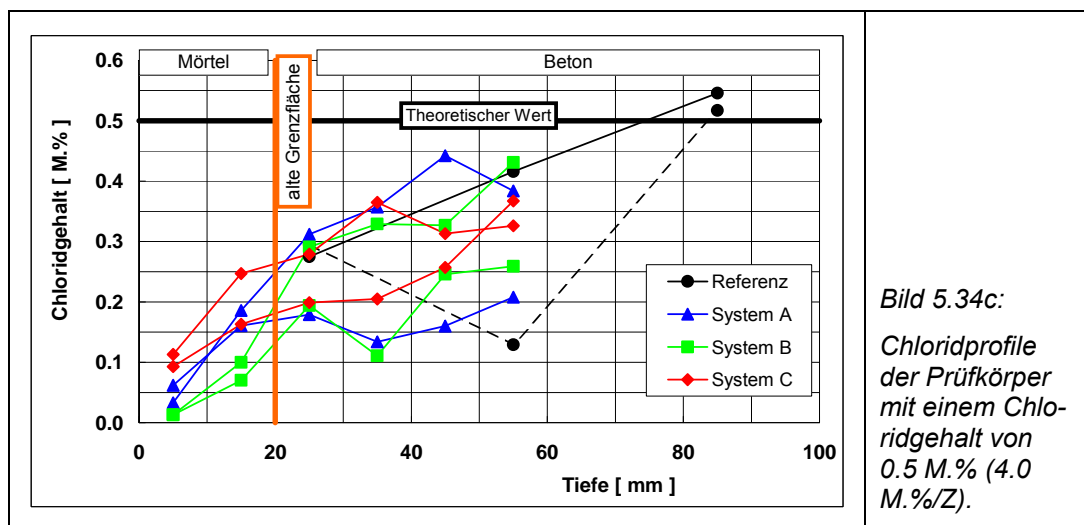


Bild 5.34c:
Chloridprofile
der Prüfkörper
mit einem Chloridgehalt von
0.5 M.% (4.0
M.%/Z).

5.5 Korrosionszustand (visuell)

Nach dem Abschluss aller Messungen und Prüfungen wurden die Stäbe ausgebaut und visuell auf Korrosion hin untersucht. Der Korrosionsangriff wurde gemäss **Tabelle 5.8** klassifiziert. Die **Bilder 5.35 a bis c** illustrieren die unterschiedliche Art und Intensität des Angriffs. Die Korrosionsbefunde der einzelnen Probekörper sind in der nachfolgenden **Tabelle 5.9** zusammengefasst. Zwischen der Korrosionsklasse und dem Chloridgehalt des Betons ist ein klarer Zusammenhang erkennbar. Mit steigendem Chloridgehalt nimmt das Ausmass des Korrosionsangriffs zu. Es ist weder ein Einfluss der Betondeckung noch des Inhibitor-Systems erkennbar.

An der nichtrostenden Bewehrung (Kathode) wurde in keinem einzigen Prüfkörper Korrosionsangriffe beobachtet werden.

Tabelle 5.8 Korrosionsklasse

Klasse	Beschreibung	Bild
0	wenig bzw. nur oberflächlicher Rost (infolge des HDW-Abtrags)	5.35a
1	Oberfläche leicht korrodiert, weniger Rost als bei 2	5.35b, unten
2	rostig, Oberfläche lokal korrodiert, Narben weniger rau und tief als bei 3	5.35b, oben
3	Lochfrass	5.35c



Bild 5.35a links: Korrosionsklasse 0.



Bild 5.35b Korrosionsklasse 1 (unten) und 2 (oben).



*Bild 5.34c:
Korrosionsklasse 3.*

Tabelle 5.9: Zusammenstellung der Korrosionsklassen aller Stäbe

PK Nr.	Chlorid	System	Betondeckung [mm]					
			10	10	10	40	40	40
21	0	A	0	0	0	0	0	0
22	0	B	0	0	0	0	0	0
25	0	R	0	0	0	0	0	0
30	0.8	A	1	1	1	1	1	1
31	0.8	R	1	1	1	1	1	1
36	0.8	B	1	1	1	1	1	1
37	0.8	C	1	0	1	1	0	1
42	2	C	3	3	2	2	2	2
43	2	A	3	2	2	2	2	2
44	2	B	2	2	3	2	2	2
45*	2	R	2	3	3	2	2	2
52	4	A	3	3	3	3	3	3
53	4	B	3	2	3	3	3	3
56	4	C	3	3	3	3	3	3
57	4	R	3	3	2	2	3	3
PK Nr.	Chlorid	System	Betondeckung [mm]					
			20	20	20	30	30	30
23	0	A	0	0	0	0	0	0
24	0	B	0	0	0	0	0	0
26	0	R	0	0	0	0	0	0
32	0.8	A	1	1	1	1	1	1
33	0.8	B	1	1	3	1	1	1
34	0.8	R	1	1	1	1	1	1
35	0.8	C	1	1	1	1	1	1
40	2	R	3	2	3	2	2	2
41	2	A	3	2	3	1	3	1
46	2	B	2	2	3	2	3	3
47	2	C	3	2	3	1	1	3
50	4	A	2	3	3	3	3	3
51	4	B	3	3	3	3	3	3
54	4	C	3	3	3	3	3	3
55	4	R	3	3	3	2	3	3

6 Folgerungen

6.1 Prüfkörper und Messkonzept

6.1.1 Prüfkörper

Die für die Untersuchungen eingesetzten Prüfkörper haben sich grundsätzlich als zweckmässig erwiesen. Für die Prüfung von anderen Inhibitorsystemen können jedoch einige Hinweise und Vorschläge für Verbesserungen gemacht werden.

Das Gewicht der Prüfkörper mit der Abmessung 400 x 400 x 100 mm (+20 mm Aufdoppelung) ist für die Handhabung an der oberen Grenze und sollte daher nicht erhöht werden.

Die Anordnung von 6 einzelnen Stäben in einem Prüfkörper ist geeignet, um eine ausreichend sichere Aussage zur Korrosion zu machen. Allerdings wird empfohlen, in Zukunft für alle 6 Stäbe die gleiche Betonüberdeckung einzustellen.

Um die Anzahl der nötigen Prüfkörper zu reduzieren, kann auf die Prüfung der Überdeckung von 20 und 40 mm verzichtet werden.

Die Wirkung des Chloridgehalts von 0.8 M.%/Z war zu Beginn gut erkennbar, flachte dann aber deutlich ab. Auf diesen Gehalt kann deshalb bei weiteren Prüfungen verzichtet werden. In der Praxis sind Chloridgehalte von 4 M.%/Z selten. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit, dass Inhibitoren bei sehr hohen Chloridgehalten wirken, gering. Deshalb sind Prüfungen bei solch hohen Gehalten nicht bzw. erst dann sinnvoll, wenn die Prüfungen bei geringeren Gehalten positiv ausgefallen sind.

Obwohl es sich gezeigt hat, dass die nichtrostende Bewehrung ebenfalls polarisiert wird und damit die Makroelementwirkung mit der Zeit schwächer wurde, wird empfohlen, an dieser Anordnung festzuhalten, allerdings mit wesentlich dickeren Durchmessern für die nichtrostenden Stähle. Einzige Alternative wäre, das Potenzial mit Gleichstrom auf einem ausreichend positiven Potenzial zu halten (Vorgehen wie beim kathodischen Korrosionsschutz). Dies verteuert einerseits die Prüfung (Installation, Kontroll- und Messaufwand etc.) und hat zudem den Nachteil, dass damit die Korrosionsbedingungen stark verschärft werden. Es besteht weiter ein gewisses Risiko, dass die Streuung der Ergebnisse verändert wird und evtl. nicht mehr praxisnah ist.

Zusammenfassend ergeben sich die in der **Tabelle 6.1** gemachten Empfehlungen für die Prüfkörper für zukünftige Untersuchungen mit Inhibitoren.

Tabelle 6.1: Empfehlung für die Prüfkörper

Abmessungen Prüfkörper	400 x 400 x 100 mm
Beton	w/z = 0.5, Zement: CEM I oder CEM II/A-LL
Chloridgehalt (Anmachwasser)	0, 1.0, 1.5 und 2.0 M.%/Z
Einzelstäbe (Anode)	6 ø 8 mm, freie Länge ≤ 50 mm
Überdeckung der Einzelstäbe (6 pro Prüfkörper)	10 und 30 mm
Kathode	Nichtrostende Bewehrung, 1.4571 oder höherwertig, 8 Stäbe ø 20 mm (je 4 Stäbe in beide Richtungen), Überdeckung: 16 bis 20 mm.
Aufdoppelung mit Instandsetzungssystem	20 mm, falls Teil des Systems, evtl. nur oberflächliche Applikation des Inhibitors
Anzahl Prüfkörper	8 Stück pro System

Grundsätzlich ist es möglich, den Beton der Prüfkörper zweischichtig einzubauen: untere ca. 4-5 cm dicke Schicht mit chloridfreiem (und ggf. normalem Betonstahl als Kathode), obere ca. 5-6 cm dicke Schicht mit chloridhaltigem Beton. Der Nachteil dabei ist, dass eine Chloridwanderung vom chloridhaltigen zum chloridfreien Beton stattfindet und, dass dadurch der Chloridgehalt mit der Zeit abnehmen und die Resultate beeinflussen könnte.

Eine weitere Möglichkeit wäre, die Chloride durch Beaufschlagen der Prüfkörper mit chloridhaltigem Wasser in den ursprünglich chloridfreien Beton einzubringen. Nachteile dieses Vorgehens sind der Mehraufwand und die Schwierigkeit bzw. Unsicherheit, einen bestimmten Zielwert für den Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe zu erreichen.

Das Abwägen der Vor- und Nachteile führt zur Erkenntnis, dass das oben beschriebene und in diesem Projekte gewählte Vorgehen zu bevorzugen ist.

6.1.2 Messkonzept

Das Messkonzept wurde so angelegt, dass die in der Praxis anzutreffenden Verhältnisse mit Korrosion an der Bewehrung und einer Behandlung mit Inhibitoren möglichst realitätsnah simuliert werden konnte. Deshalb wurde bei den Untersuchungen in der ersten 9-monatigen Phase die Korrosion der Einzelstäbe in Gang gebracht. Danach wurden die Prüfkörper mit dem Instandsetzungssystem behandelt und für weitere 12 Monate messtechnisch überwacht.

Insgesamt haben sich das Messkonzept als Gesamtes sowie das generelle Vorgehen und die Häufigkeit der Messungen als zweckmässig erwiesen. Insbesondere wichtig ist die Vorlagerung, damit ein ausreichender, in der Praxis zu erwartender Korrosionsangriff auf der Bewehrung stattfinden kann.

Für weitere Prüfungen können gewisse Vereinfachungen vorgeschlagen werden (**Tabelle 6.2**).

Die Messungen könnten zwar automatisiert werden (Mehraufwand für Installation und Auswertung), der Gewinn an Mehrinformation ist aber wahrscheinlich bescheiden.

Tabelle 6.2: Empfehlung für das Messkonzept

Vorlagerungszeit der Prüfkörper	≥8 Monate, bewitterte Aussenlagerung
Auslagerungszeit nach Behandlung	≥12 Monate, bewitterte Aussenlagerung
Korrosionstechnische Messungen während Auslagerung (Vorlagerung und nach Behandlung)	Potenzial über den Einzelstäben Widerstand, Spannungsdifferenz und Stromfluss zwischen den Einzelstäben und der Netzbewehrung (Kathode) Gesamtwiderstand, Spannungsdifferenz und Stromfluss zwischen allen Einzelstäben und der Netzbewehrung (Kathode)
Abschlussmessungen	2 Haftzugprüfungen und 2 Chloridprofile pro Prüfkörper
Ergebnisse	Zeitliche Veränderungen (Potenzial, Abtrag/Korrosionsrate, spezifischer elektrischer Betonwiderstand, Chloridprofile, Haftzugfestigkeit)
Beurteilung der Ergebnisse	Vergleich der Ergebnisse der behandelten mit jenen der unbehandelten Prüfkörper

6.2 Wirkung der Instandsetzung mit Inhibitoren

6.2.1 Korrosion

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass keines der drei geprüften Instandsetzungs- bzw. Inhibitorsysteme die laufende Korrosion an der Bewehrung wesentlich zu reduzieren oder sogar zu stoppen vermochte. Diese Folgerung stützt sich auf die Ergebnisse von unabhängig voneinander gemessenen korrosionstechnisch wichtigen Größen, d.h. Potenzial, Stromfluss (Korrosionsgeschwindigkeit, Abtragsrate) und spezifischer elektrischer Betonwiderstand, sowie auf die visuelle Beurteilung der ausgebauten Stäbe. Diese Aussage gilt sicher für Chloridgehalte ≥ 2 M.%/Z. Aber selbst bei einem Chloridgehalt von 0.8 M.%/Z konnten keine Veränderungen beobachtet werden, die direkt auf die Wirkung der Inhibitoren hätten zurückgeführt werden können.

Der Bereich zwischen 0.8 und 2.0 M.%/Z wurde zwar nicht geprüft, auf Grund der Resultate darf aber angenommen werden, dass die geprüften Inhibitoren auch in diesem Bereich mit einiger Wahrscheinlichkeit keine ausreichende korrosionshemmende Wirkung gehabt hätten.

Mit diesen negativen Ergebnissen können die gestellten Fragen (siehe **Kapitel 2.5**) nur teilweise beantwortet werden (**Tabelle 6.3**). Die Antworten gelten für die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. Die Wirkung von Inhibitoren bei der Korrosion infolge karbonatisiertem Beton wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Die analogen Fragen dazu können daher nicht beantwortet werden.

Tabelle 6.3: Antworten auf die gestellten Fragen (chloridinduzierte Korrosion)

Frage		Antwort
1	Wann ist die Anwendung von Inhibitoren für die Instandsetzung von Stahlbetonbauten sinnvoll und wirtschaftlich?	Basierend auf dem heutigen Wissen kann die Anwendung von Inhibitoren für die Instandsetzung von chloridverseuchten Stahlbetonbauten mit bereits stark korrodierender Bewehrung nicht empfohlen werden. Es ist möglich, dass dann, wenn die Bewehrung noch nicht oder nur wenig korrodiert, die Anwendung von Inhibitoren erfolgreich ist. Diese Situation wurde hier nicht untersucht (→ Forschungsbedarf).
2	Welche Produkte können unter welchen Umständen erfolgreich angewendet werden (maximaler Restchloridgehalt im Beton)?	Chloridgehalte ≤ 0.8 M.%/Z auf Bewehrungshöhe können toleriert werden (kein Inhibitor nötig), wenn der Beton nach der Instandsetzung austrocknen kann. Es gibt zurzeit kein inhibitorhaltiges Produkt, das bei höheren Chloridgehalten und stark korrodierender Bewehrung zielsicher eingesetzt werden kann.
3	Wie soll der Betonuntergrund vorbehandelt werden?	Das übliche Aufrauen der Oberfläche zur Herstellung eines guten Verbundes ist ausreichend. Erhöhte Chloridgehalte können möglicherweise den Verbund schwächen.
4	Wie hoch darf der verbleibende Restchloridgehalt im Beton sein?	Der zulässige Restchloridgehalt richtet sich nach den bisherigen Kriterien ohne Einsatz von Inhibitoren. Haupteinflüsse sind z.B. Betonfeuchtigkeit und zulässige Korrosionsgeschwindigkeit nach der Instandsetzung sowie Restnutzungsdauer.

Tabelle 6.3: Antworten auf die gestellten Fragen (chloridinduzierte Korrosion)

Frage		Antwort
5	Wie gross sind die möglichen Transportwege für Inhibitoren im Beton (maximal zulässige Überdeckung vor der Applikation des Inhibitors)?	Die geprüften Inhibitoren zeigten selbst bei einer Überdeckung von 10 mm keine Wirkung. Wenn die Bewehrung korrodiert, entstehen Korrosionsprodukte auf der Oberfläche der Bewehrung. Diese stellen ein zusätzliches Hindernis für den Weg des Inhibitors zur Stahloberfläche dar. Noch kleinere Überdeckungen sind, insbesondere in Anbetracht der üblichen Streuungen an einem Bauteil, für die Praxis nicht relevant. Überdeckungen ≥ 20 bis 30 mm sollten zurzeit nicht in Erwägung gezogen werden.
6	Wie kann/soll das Bauwerk nachträglich überwacht werden?	Die Überwachung der Wirkung von Inhibitoren kann mit den üblichen korrosionstechnischen Mitteln überwacht werden. Die Wirkung sollte, bei üblichen Überdeckungen, spätestens nach 6 bis 12 Monaten erkennbar sein. Die Überwachung sollte deshalb in den ersten Monaten intensiver sein als in den folgenden Jahren.
7	Wie können in Zukunft neue Produkte geprüft und beurteilt werden?	Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Prüfkörper und das verwendete Messkonzept können mit geringfügigen Anpassungen für die Prüfung von neuen Produkten und Systemen übernommen werden.

Abschliessend soll in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass z.B. Sika im Produktdatenblatt darauf aufmerksam, dass das Sika FerroGard-903 bei Chloridgehalten über 1 M.%/Z nicht eingesetzt werden sollte. Gemäss Angaben der Sika kann die Korrosionsgeschwindigkeit maximal halbiert, aber nicht auf null reduziert werden. Sika empfiehlt deshalb die Anwendung von Zusatzmassnahmen (z.B. Hydrophobierung).

6.2.2 Chloridprofile

Die Diffusion (Wanderung) der Chloridionen aus dem Altbeton (Untergrund) in die neue Mörtelschicht konnte bereits nach 1 Jahr Aussenlagerung sehr gut nachgewiesen werden. Zwischen den verschiedenen Mörteln konnte grosse Unterschiede beobachtet werden. Die stärkste Rückwanderung fand beim System C statt, gefolgt von den Systemen A und B (**Bilder 5.34a bis c**).

6.2.3 Haftverbund

Als Mass für den Verbund zwischen Instandsetzungsmörtel und Untergrund (Altbeton) wurde die Haftzugfestigkeit verwendet.

Beim System A wurden die höchsten, beim System B die niedrigsten Haftzugfestigkeiten gemessen. Die Unterschiede zwischen den eingesetzten Systemen sind insgesamt betrachtet gering, die Streuung aber erheblich. Im Mittel liegen die Haftzugfestigkeiten der Systeme nach ca. 1-jähriger Aussenlagerung um oder etwas über 1.5 N/mm^2 .

Die Haftzugfestigkeit wird vermutlich von der Korrosion (innere Risse) und dem Chloridgehalt im Untergrund (Schwächung des Verbundes) beeinflusst.

Im Rahmen der Erstprüfung sollte der Nachweis erbracht werden, dass das Inhibitorsystem die Haftzugfestigkeit nicht unzulässig vermindert.

6.3 Weitere Aspekte

Die Aufdoppelung mit einem Mörtel zur Erhöhung der Bewehrungsüberdeckung und damit zur Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit ohne vorgängigen Betonabtrag hat sich bei der chloridinduzierten Korrosion der Bewehrung als nicht Erfolg versprechende Massnahme erwiesen.

Anhänge

I	Tabellarische Zusammenstellung der Resultate	99
I.1	Potenzial, Gesamtstrom, Gesamtspannung und Gesamtwiderstand.....	99
I.2	Einzelstrom	109
I.3	Einzelspannung und Einzelwiderstand	117

I Tabellarische Zusammenstellung der Resultate

I.1 Potenzial, Gesamtstrom, Gesamtspannung und Gesamtwi- derstand

Übersicht über die Bezeichnung und Zuordnung der Probekörper

Probekörper Nr.	System	Überdeckung Bewehrung, mm	Chloridgehalt, M.%/Z
21	A	10/40	0
22	B	10/40	0
23	A	20/30	0
24	B	20/30	0
25	R	10/40	0
26	R	20/30	0
30	A	10/40	0.8
31	R	10/40	0.8
32	A	20/30	0.8
33	B	20/30	0.8
34	R	20/30	0.8
35	C	20/30	0.8
36	B	10/40	0.8
37	C	10/40	0.8
40	R	20/30	2
41	A	20/30	2
42	C	10/40	2
43	A	10/40	2
44	B	10/40	2
45	R	10/40	2
46	B	20/30	2
47	C	20/30	2
50	A	20/30	4
51	B	20/30	4
52	A	10/40	4
53	B	10/40	4
54	C	20/30	4
55	R	20/30	4
56	C	10/40	4
57	R	10/40	4

Nullmessung vom 23.07.2007																			
Probekörper																			
Nr.	Chlorid, M.%/Z	Überdeck., mm	Potenzial [mV _{CSE}]												Gesamt-				
			10 a	10 b	10 c	40 a	40 b	40 c	20 a	20 b	20 c	30 a	30 b	30 c	Widerstand [Ω]	Strom [μA]		Spannung [mV]	
																sofort	nach 1 min	sofort	nach 1 min
21	0	10/40	-90	-107	-99	-97	-101	-91							85.7	-2.5	-	-3.3	-5.6
22	0	10/40	-70	-101	-100	-67	-86	-84							88.9	-0.9	-0.5	2.3	-0.6
23	0	20/30							-53	-74	-67	-53	-71	-78	87.7	-1.5	-0.4	-0.1	-1.7
24	0	20/30							-71	-100	-95	-80	-93	-94	88.1	-2.3	-1.3	-0.4	-4.8
25	0	10/40	-51	-90	-86	-49	-82	-76							84.0	-4.1	-1.5	1.2	-5.7
26	0	20/30							-33	-82	-81	-35	-63	-65	92.5	-2.3	-0.8	-0.3	-3.3
30	0.8	10/40	-344	-366	-353	-315	-330	-328							61.8	208	169	40	93
31	0.8	10/40	-367	-356	-354	-312	-330	-322							67.1	173	157	41	93
32	0.8	20/30							-335	-334	-324	-303	-322	-312	62.8	159	157	38	87
33	0.8	20/30							-280	-330	-311	-260	-305	-309	65.9	131	121	34	74
34	0.8	20/30							-298	-328	-318	-275	-314	-314	60.8	178	159	40	93
35	0.8	20/30							-255	-302	-321	-246	-291	-287	68.5	97	89	24	61
36	0.8	10/40	-297	-321	-309	-288	-316	-314							62.7	148	128	30	78
37	0.8	10/40	-261	-304	-288	-258	-271	-266							79.9	98	77	23	63
40	2	20/30							-433	-456	-464	-433	-443	-435	47.5	303	319	63	135
41	2	20/30							-439	-443	-442	-417	-424	-444	49.9	200	197	37	73
42	2	10/40	-461	-479	-445	-424	-422	-416							50.7	318	319	70	118
43	2	10/40	-403	-445	-455	-390	-395	-404							56.0	264	266	59	136
44	2	10/40	-438	-436	-443	-417	-402	-399							54.0	279	266	56	125
45	2	10/40	-445	-440	-455	-417	-418	-431							52.5	255	280	58	127
46	2	20/30							-410	-440	-433	-412	-413	-404	48.6	207	193	38	71
47	2	20/30							-427	-428	-440	-414	-416	-411	55.1	255	283	58	125
50	4	20/30							-492	-536	-529	-519	-526	-528	35.9	358	442	75	164
51	4	20/30							-510	-538	-537	-528	-526	-532	37.4	291	367	64	143
52	4	10/40	-522	-540	-541	-511	-521	-510							35.6	346	392	68	147
53	4	10/40	-532	-516	-531	-501	-502	-505							37.2	398	396	70	140
54	4	20/30							-513	-514	-517	-515	-529	-523	34.0	319	411	68	144
55	4	20/30							-534	-541	-527	-493	-520	-531	38.9	407	439	80	166
56	4	10/40	-498	-522	-532	-472	-517	-513							35.2	349	387	86	148
57	4	10/40	-532	-531	-518	-476	-493	-500							40.9	300	339	64	137

1. Messung vom 20.09.2007																			
Probekörper																			
Nr.	Chlorid, M.%/Z	Überdeck., mm	Potenzial [mV _{CSE}]												Widerstand [Ω]	Gesamt-			Spannung [mV] nach 1 min
			10 a	10 b	10 c	40 a	40 b	40 c	20 a	20 b	20 c	30 a	30 b	30 c		Strom [μA] sofort	Strom [μA] nach 1 min	Peak	
21	0	10/40	-60	-43	-57	-80	-67	-64							132.8	1.35	0.69	-	-
22	0	10/40	-61	-59	-51	-71	-60	-68							134.7	0.25	0.15	-	-
23	0	20/30							-40	-50	-41	-37	-31	-43	132.9	-0.4	-0.01	-	-
24	0	20/30							-44	-52	-45	-56	-50	-52	131.3	-0.4	-0.15	-	-
25	0	10/40	-33	-40	-42	-38	-36	-54							126.3	-0.4	-0.18	-	-
26	0	20/30							-100	-60	-61	-40	-53	-45	138.0	-0.3	-0.11	-	-
30	0.8	10/40	-200	-181	-203	-191	-189	-186							91.6	22.5	22.4	19.97	-
31	0.8	10/40	-160	-178	-178	-165	-171	-177							97.8	12.3	14.7	13.91	-
32	0.8	20/30							-218	-204	-210	-200	-186	-184	92.5	21.1	22	19.5	-
33	0.8	20/30							-178	-190	-191	-189	-174	-189	97.7	19.8	17.4	16.2	-
34	0.8	20/30							-170	-183	-187	-181	-187	-190	89.3	20.1	19	17.3	-
35	0.8	20/30							-150	-166	-181	-168	-179	-188	102.3	-3.6	-3.29	-3.2	-
36	0.8	10/40	-150	-257	-165	-139	-164	-157							89.9	7.2	7.78	7	-
37	0.8	10/40	-168	-178	-170	-157	-166	-144							120.2	-8.29	-9.08	-8.15	-
40	2	20/30							-405	-395	-389	-370	-360	-363	72.9	132	164	131	-
41	2	20/30							-363	-344	-343	-316	-333	-352	76.0	67	75	64	-
42	2	10/40	-400	-412	-408	-365	-380	-367							76.4	96	118		-
43	2	10/40	-423	-405	-389	-346	-352	-361							82.7	151	182		-
44	2	10/40	-352	-398	-400	-373	-380	-382							79.5	149	173	143	-
45	2	10/40	-376	-401	-387	-384	-368	-350							77.1	154	171	146	-
46	2	20/30							-362	-390	-411	-365	-359	-363	71.9	118	134	114	-
47	2	20/30							-383	-369	-375	-350	-340	-344	83.0	142	148		-
50	4	20/30							-498	-505	-505	-474	-483	-501	54.4	320	261		-
51	4	20/30							-503	-512	-484	-490	-473	-475	68.2	170	214		-
52	4	10/40	-503	-507	-499	-476	-484	-468							54.4	171	232		-
53	4	10/40	-473	-473	-454	-433	-433	-436							56.9	157	216		-
54	4	20/30							-471	-471	-487	-466	-477	-481	51.8	176	231		-
55	4	20/30							-510	-513	-500	-478	-486	-506	58.6	220	271		-
56	4	10/40	-457	-471	-494	-458	-475	-463							55.4	176	222		-
57	4	10/40	-470	-460	-447	-422	-427	-438							63.1	137	169		-

3. Messung vom 04.08.2008																			
Probekörper																			
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	Potenzial [mV _{CSE}]												Gesamt-				
			10 a	10 b	10 c	40 a	40 b	40 c	20 a	20 b	20 c	30 a	30 b	30 c	Widerstand [Ω]	Strom [μA]			Spannung [mV]
															sofort	nach 1 min	Peak	nach 1 min	
21	0	10/40	-173	-175	-163	-173	-174	-173							286	0.1	0.1	0.1	-
22	0	10/40	-91	-85	-84	-89	-84	-95						367	0.1	0.1	0.1	-	
23	0	20/30							-140	-144	-150	-163	-156	-155	303	0.1	0.1	0.1	-
24	0	20/30							-107	-106	-111	-103	-107	-104	314	0.0	0.1	0.0	-
25	0	10/40	-65	-89	-75	-81	-53	-47						187	9.0	0.7	18.0	-	
26	0	20/30							-109	-78	-77	-76	-60	-50	223	18.0	0.4	47.0	-
30	0.8	10/40	-316	-319	-319	-331	-332	-342						172	19.0	19.0	22.0	-	
31	0.8	10/40	-48	-71	-59	-46	-68	-73						153	21.0	3.7	56.0	-	
32	0.8	20/30							-259	-261	-251	-267	-265	-265	181	-1.5	-1.4	-1.7	-
33	0.8	20/30							-126	-128	-130	-128	-129	-128	216	0.3	0.6	-	-
34	0.8	20/30							-143	-149	-144	-162	-130	-117	134	18.0	-5.0	72.0	-
35	0.8	20/30							-190	-188	-168	-194	-182	-177	172	1.3	1.2	-	-
36	0.8	10/40	-177	-185	-176	-181	-171	-184						183	4.0	4.0	5.0	-	
37	0.8	10/40	-302	-308	-322	-301	-288	-299						210	-0.7	-0.6	-0.9	-	
40	2	20/30							-389	-344	-326	-338	-340	-363	93	190	81	228	-
41	2	20/30							-390	-389	-386	-406	-421	-403	130	17	18	18	-
42	2	10/40	-343	-356	-349	-352	-363	-352						130	19	20	-	-	
43	2	10/40	-380	-364	-352	-348	-352	-350						145	21	22	24	-	
44	2	10/40	-248	-261	-246	-270	-252	-243						176	9	9	10	-	
45	2	10/40	-328	-457	-380	-377	-372	-364						102	180	76	200	-	
46	2	20/30							-264	-269	-282	-271	-278	-271	137	3	3	3	-
47	2	20/30							-404	-388	-385	-373	-369	-362	133	42	34	62	-
50	4	20/30							-420	-437	-432	-444	-454	-473	85	70	78	-	-
51	4	20/30							-401	-417	-394	-390	-390	-378	100	52	62	-	-
52	4	10/40	-454	-461	-461	-489	-488	-478						79	72	77	79	-	
53	4	10/40	-336	-368	-386	-373	-404	-417						96	76	82	88	-	
54	4	20/30							-485	-489	-477	-469	-479	-502	73	148	152	154	-
55	4	20/30							-561	-541	-543	-509	-538	-560	67	280	133	316	-
56	4	10/40	-477	-465	-468	-456	-462	-457						72	98	106	101	-	
57	4	10/40	-430	-454	-448	-471	-507	-527						74	250	120	270	-	
			Rostfleck auf der Frostseite im Bereich der Potenzialmessstelle																

6. Messung vom 21.04.2009

Probekörper

Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	Potenzial [mV _{CSE}]												Gesamt-				
			10			40			20			30			Widerstand [Ω]	Strom [µA]			Spannung [mV] nach 1 min
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c		sofort	nach 1 min	Peak	
21	0	10/40	-10	-10	8	-12	-20	-2							195	0.1	0.1	-	-5
22	0	10/40	25	27	22	6	42	18							210	0.1	0.1	-	-7
23	0	20/30							12	-4	9	-30	-7	5	277	0.1	0.1	-	-4
24	0	20/30							-20	-3	16	-14	-8	-13	136	0.0	0.0	-	-10
25	0	10/40	-90	-98	-67	-89	-65	-34							158	0.1	0.1	-	-9
26	0	20/30							-108	-99	-97	-81	-87	-68	169	0.1	0.1	-	-1.5
30	0.8	10/40	-127	-134	-194	-150	-145	-140							125	-22.0	-22.0	-30.0	-95
31	0.8	10/40	-100	-129	-103	-111	-127	-119							121	0.7	0.6	0.9	8
32	0.8	20/30							-46	-54	-33	-29	-40	-20	136	0.0	0.1	-	-2
33	0.8	20/30							-144	-120	-144	-126	-124	-130	151	13.0	13.0	14.0	90
34	0.8	20/30							-125	-130	-136	-135	-133	-127	109	-2.8	-2.7	-3.5	-32
35	0.8	20/30							2	-10	-2	10	-5	-4	131	0.9	0.9	-	11
36	0.8	10/40	-50	-31	-29	-25	-55	-30							121	0.9	0.8	1.0	13
37	0.8	10/40	23	16	20	11	25	13							146	0.6	0.5	-	6
40	2	20/30							-327	-266	-246	-287	-269	-277	83	36	41	38	167
41	2	20/30							-240	-233	-243	-254	-256	-276	94	25.0	26.0	28	59
42	2	10/40	-170	-150	-145	-157	-152	-138							96	16.0	18.0	-	38
43	2	10/40	-213	-190	-211	-213	-221	-241							112	15.0	17.0	19	121
44	2	10/40	-150	-180	-170	-155	-155	-158							117	13.0	14.0	-	85
45	2	10/40	-318	-366	-311	-314	-320	-333							99	38	36	40	159
46	2	20/30							-205	-203	-223	-187	-193	-227	90	22	24	-	46
47	2	20/30							-250	-220	-211	-209	-210	-220	87	52.0	60.0	54	98
50	4	20/30							-425	-425	-401	-467	-405	-425	45	127	153	138	223
51	4	20/30							-455	-430	-425	-469	-390	-380	43	98	136	-	192
52	4	10/40	-434	-418	-440	-437	-474	-425							41	109	130	-	186
53	4	10/40	-270	-288	-280	-269	-349	-332							64	67	83	-	110
54	4	20/30							-370	-390	-420	-380	-440	-430	36	103	130	106	162
55	4	20/30							-470	-490	-499	-499	-490	-520	62	72	90	-	185
56	4	10/40	-380	-370	-355	-360	-380	-355							41	108	130	111	102
57	4	10/40	-450	-480	-480	-495	-525	-515							61	200	138	360	249

Rostfleck auf der Frostseite im Bereich der Potenzialmessstelle

7. Messung (Schlussmessung) vom 15.09.2009

Probekörper

Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	Potenzial [mV _{CSE}]												Widerstand [Ω]	Gesamt-			Spannung [mV] nach 1 min
			10			40			20			30				sofort	nach 1 min	Peak	
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c					
21	0	10/40	-50	-56	-37	-63	-62	-45							330	0.1	0.1	-	-3
22	0	10/40	45	43	38	36	48	39							457	0.1	0.1	-	-6
23	0	20/30							-15	-18	-12	-38	-29	-36	349	0.1	0.1	-	-2
24	0	20/30							6	2	50	-10	20	22	253	-0.1	0.0	-	-9
25	0	10/40	-30	-58	-44	-59	-22	26							333	0.1	0.1	-	-3
26	0	20/30							-40	-60	-55	-48	-35	-18	356	0.1	0.1	-	-6
30	0.8	10/40	-110	-109	-155	-128	-112	-97							198	1.0	1.0	-	12
31	0.8	10/40	-48	-72	-56	-50	-76	-80							212	-0.6	-0.3	-	-10
32	0.8	20/30							-75	-100	-84	-100	-62	-72	216	-6.0	-4.0	-	-64
33	0.8	20/30							-17	-5	-18	-16	-14	-16	238	2.0	2.0	-	27
34	0.8	20/30							-61	-82	-85	-67	-74	-44	188	-0.9	-0.8	-	-16
35	0.8	20/30							68	48	68	79	76	86	210	0.3	0.3	-	4
36	0.8	10/40	-10	-10	3	5	-50	-40							184	0.5	0.5	-	10
37	0.8	10/40	90	75	90	76	71	75							233	0.1	0.0	-	-2
40	2	20/30							-290	-255	-206	-245	-255	-256	132	-39	-37	-39	-84
41	2	20/30							-194	-206	-218	-211	-218	-220	152	-4.0	-4.0	-	-14
42	2	10/40	-133	-98	-76	-96	-112	-79							142	7.0	7.0	6	27
43	2	10/40	-200	-193	-186	-206	-214	-218							179	6.0	6.0	-	53
44	2	10/40	-100	-160	-110	-98	-102	-101							177	6.0	6.0	5	55
45	2	10/40	-314	-251	-360	-353	-393	-366							162	35	32	34	144
46	2	20/30							-120	-130	-160	-130	-120	-155	136	50	37	-	78
47	2	20/30							-245	-200	-200	-194	-195	-175	121	-16.0	-17.0	-	-20
50	4	20/30							-433	-427	-428	-480	-512	-484	58	73	87	-	112
51	4	20/30							-444	-395	-410	-445	-450	-405	65	42	52	-	134
52	4	10/40	-444	-390	-420	-502	-467	-442							55	11	13	-	8
53	4	10/40	-288	-305	-288	-305	-385	-395							73	52	56	-	55
54	4	20/30							-336	-410	-336	-395	-415	-395	53	53	58	-	81
55	4	20/30							-424	-434	-468	-440	-470	-450	98	37	42	-	77
56	4	10/40	-357	-320	-336	-400	-420	-380							49	69	80	-	68
57	4	10/40	-403	-440	-503	-470	-515	-515							86	59	58	65	108
			Rostfleck auf der Frostseite im Bereich der Potenzialmessstelle													Risse über den Stäben in der Mörtelschicht			

I.2 Einzelstrom

Übersicht über die Bezeichnung und Zuordnung der Probekörper

Probekörper Nr.	System	Überdeckung Bewehrung, mm	Chloridgehalt, M.%/Z
21	A	10/40	0
22	B	10/40	0
23	A	20/30	0
24	B	20/30	0
25	R	10/40	0
26	R	20/30	0
30	A	10/40	0.8
31	R	10/40	0.8
32	A	20/30	0.8
33	B	20/30	0.8
34	R	20/30	0.8
35	C	20/30	0.8
36	B	10/40	0.8
37	C	10/40	0.8
40	R	20/30	2
41	A	20/30	2
42	C	10/40	2
43	A	10/40	2
44	B	10/40	2
45	R	10/40	2
46	B	20/30	2
47	C	20/30	2
50	A	20/30	4
51	B	20/30	4
52	A	10/40	4
53	B	10/40	4
54	C	20/30	4
55	R	20/30	4
56	C	10/40	4
57	R	10/40	4

Nullmessung vom 26. + 27.07.2007																																								
Probekörper																																								
Nr.	Chlorid, M.%/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30																			
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c															
			#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min											
21	0	10/40	1	1.8	0.4	6	-0.2	-0.2	4	-0.3	-0.1	3	-0.4	0.3	5	-0.3	-0.2	2	0.2	-0.2																				
22	0	10/40	2	1.4	0.2	6	1.4	0.5	5	-2.7	-0.5	1	-5.4	-0.6	4	-1.5	-0.6	3	-2.5	-0.5																				
23	0	20/30																			2	-0.8	-0.2	5	-0.8	-0.3	3	-1.0	-0.3	1	1.8	0.2	4	-0.8	-0.2	6	-1.4	-0.3		
24	0	20/30																			1	-3.4	-0.4	6	-0.7	-0.4	5	-2.2	-0.4	2	-2.0	-0.7	3	-1.4	-0.6	4	-0.8	-0.4		
25	0	10/40	2	-2.0	-0.6	6	-1.8	-0.4	5	-2.2	-0.4	1	-2.9	-0.7	4	-1.0	-0.5	3	-2.5	-0.6																				
26	0	20/30																			1	-1.4	-0.4	6	-0.9	-0.4	5	-1.4	-0.3	2	-1.0	-0.4	3	-1.1	-0.3	4	-1.4	-0.3		
30	0.8	10/40	4	81	55	6	141	119	5	32	25	1	92	48	3	-2.1	-1.6	2	-13	-3.1																				
31	0.8	10/40	6	127	123	5	87	72	4	81	56	1	31	7.6	3	27	11	2	-110	-41																				
32	0.8	20/30																			6	101	64	5	77	39	4	35	19	1	34	15	3	20	13	2	-22	-8.1		
33	0.8	20/30																			2	7.0	2.8	6	132	87	5	2.8	0.4	1	-26	-8.8	3	7.3	5.3	4	21	15		
34	0.8	20/30																			2	63	30	6	81	54	5	27	13	1	-27	-6.6	3	52	27	4	5.6	4.5		
35	0.8	20/30																			2	14	7.5	5	49	28	6	55	43	1	-31	-6.9	4	-12	-5.3	3	-24	-5.8		
36	0.8	10/40	2	51	35	6	45	31	3	15	7.0	1	72	29	5	29	20	4	9.0	6.0																				
37	0.8	10/40	2	32	16	6	41	31	5	41	22	1	-5.3	-2.2	4	-7.2	-2.8	3	-15	-4.8																				
40	2	20/30																			2	135	104	5	63	42	6	156	150	1	61	38	4	32	17	3	-30	-12		
41	2	20/30																			3	73	50	5	49	41	4	4.1	4.9	1	83	57	2	-68	-30	6	81	7.3		
42	2	10/40	5(1)	-53	-51	6	-182	-167	4	-80	-67	3	-63	-42	2(5)	1.8	-4.4	1(2)	18	7.7																				
43	2	10/40	3	4.8	1.5	5	109	88	6	143	155	1	25	12	2	-66	-21	4	-24	-12																				
44	2	10/40	5	146	123	4	32	34	6	156	158	3	137	98	2	-106	-46	1	-96	-43																				
45	2	10/40	5	121	95	4	17	14	6	115	121	1	57	28	2	-155	-34	3	76	45																				
46	2	20/30																			2	30	13	6	124	118	5	103	76	3	20	16	4	64	55	1	-76	-39		
47	2	20/30																			4	89	76	5	56	56	6	113	125	2	13	5.4	3	81	54	1	41	28		
50	4	20/30																			1	84	65	6	252	256	5	76	79	2	105	89	3	81	77	4	131	102		
51	4	20/30																			1	68	44	6	194	186	5	124	113	3	144	106	2	12	12	4	97	103		
52	4	10/40	4	96	69	5	157	153	6	174	212	2	63	44	3	160	131	1	-20	-13																				
53	4	10/40	6	233	223	4	124	95	5	153	134	1	32	23	2	60	46	3	77	72																				
54	4	20/30																			1	126	101	2	4.8	11	4	96	95	3	116	89	6	262	267	5	121	104		
55	4	20/30																			5(2)	157	123	6(5)	270	230	3(6)	181	190	1	89	66	2(4)	34	40	4(3)	171	140		
56	4	10/40	2	86	70	5	117	112	6	213	236	1	25	16	4	195	160	3	50	47																				
57	4	10/40	6	201	221	5	193	164	4	70	66	1	20	13	2	-50	-34	3	90	71																				

Reihenfolge der Messung
 (#) falsche Messreihenfolge (siehe PKs Nr. 42 und 55)

2. Messung vom 01. + 02.04.2008																																							
Probekörper			Einzelstrom [µA]																																				
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	10			40			20			30																											
			a		b		c		a		b		c		a		b		c																				
			#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min	#	sofort	1 min																
21	0	10/40	2	0.1	0.1	5	0.1	0.1	1	0.1	0.1	6	0.1	0.1	3	0.1	0.1	4	0.1	0.1																			
22	0	10/40	4	0.1	0.1	3	0.2	0.2	1	0.1	0.1	5	0.1	0.1	6	0.1	0.1	2	0.1	0.1																			
23	0	20/30																			6	0.1	0.1	3	0.1	0.1	2	0.1	0.1	1	0.2	0.1	5	0.1	0.1	4	0.1	0.1	
24	0	20/30																			2	0.1	0.1	5	0.1	0.1	3	0.1	0.1	6	0.1	0.1	4	0.1	0.1	1	0.1	0.1	
25	0	10/40	4	0.1	0.1	5	0.1	0.1	6	0.1	0.1	1	0.1	0.1	3	0.1	0.1	2	0.1	0.1																			
26	0	20/30																			1	0.1	0.1	4	0.1	0.1	5	0.1	0.1	2	0.1	0.1	3	0.1	0.1	6	0.1	0.1	
30	0.8	10/40	2	-0.5	-0.3	4	0.1	0.1	5	-0.3	-0.2	1	-0.3	-0.1	3	0.9	0.7	6	1.1	0.7																			
31	0.8	10/40	2	-0.2	-0.1	3	-0.1	0.0	6	-0.6	-0.4	4	0.4	0.4	1	0.1	0.1	5	0.1	0.1																			
32	0.8	20/30																			2	4.7	3.8	4	0.1	0.1	3	-0.7	-0.1	1	-0.7	-0.4	5	-0.4	-0.2	6	-0.2	-0.1	
33	0.8	20/30																			1	-2.6	-1.7	6	5.4	4.6	4	-2.6	-1.7	5	-0.6	-0.3	2	-1.1	-0.7	3	3.4	2.3	
34	0.8	20/30																			4	-2.8	-2.1	5	-1.7	-1.2	1	-2.0	-1.2	6	-0.6	-0.3	3	-1.3	-0.9	2	-1.0	-0.6	
35	0.8	20/30																			1	-0.3	-0.2	2	0.1	0.1	5	-0.9	-0.5	3	0.1	0.1	6	0.2	0.1	4	-0.1	0.0	
36	0.8	10/40	5	-0.1	-0.1	1	-0.2	-0.2	4	-0.1	0.0	6	1.1	0.5	3	0.3	0.2	2	0.1	0.1																			
37	0.8	10/40	4	-0.1	0.0	5	0.0	0.0	2	0.0	0.0	6	0.0	0.1	1	0.1	0.1	3	0.1	0.1																			
40	2	20/30																			6	-150	-117	5	-22	-17	3	16	12	4	-12	-8	2	-11	-10	1	-15	-12	
41	2	20/30																			5	35	29	6	27	30	1	-5	-4	3	16	12	2	-1	-1	4	5	6	
42	2	10/40	2	15	12	1	-7	-6	6	73	63	4	-2	-2	5	-7	-4	3	-11	-6																			
43	2	10/40	6	90	92	4	1	-0.3	5	60	51	1	-18	-12	2	-16	-10	3	-16	-12																			
44	2	10/40	1	4	3	5	4	2	6	99	91	2	-7	-5	3	-4	-4	4	-12	-9																			
45	2	10/40	4	-9	-8	6	150	115	5	-6	-6	3	8	4	2	-24	-13	1	-13	-10																			
46	2	20/30																			1	-20	-15	5	17	12	6	110	95	2	-8	-8	4	-10	-11	3	-19	-13	
47	2	20/30																			6	65	55	4	-10	-9	5	17	12	3	-6	-3	2	1	2	1	8	6	
50	4	20/30																			4	43	35	6	155	142	5	12	14	1	14	13	3	7	12	2	41	32	
51	4	20/30																			1	2	2	6	74	94	4	20	15	5	98	83	3	-20	-17	2	5	4	
52	4	10/40	4	26	21	6	86	92	2	12	9	3	-15	-11	5	73	66	1	-6	-4																			
53	4	10/40	5	94	89	4	26	23	6	58	73	1	-20	-15	3	-8	-6	2	0.7	-0.7																			
54	4	20/30																			1	42	35	3	-35	-29	5	90	86	2	1	4	6	103	115	4	46	36	
55	4	20/30																			2	46	39	6	78	72	4	16	13	3	7	10	1	-8	-6	5	112	115	
56	4	10/40	6	52	68	2	-26	-22	5	73	75	1	-15	-11	4	90	74	3	-9	-9																			
57	4	10/40	6	54	62	5	51	48	1	-195	-171	3	-15	-11	4	8	5	2	4	0.9																			

I.3 Einzelspannung und Einzelwiderstand

Übersicht über die Bezeichnung und Zuordnung der Probekörper

Probekörper Nr.	System	Überdeckung Bewehrung, mm	Chloridgehalt, M.%/Z
21	A	10/40	0
22	B	10/40	0
23	A	20/30	0
24	B	20/30	0
25	R	10/40	0
26	R	20/30	0
30	A	10/40	0.8
31	R	10/40	0.8
32	A	20/30	0.8
33	B	20/30	0.8
34	R	20/30	0.8
35	C	20/30	0.8
36	B	10/40	0.8
37	C	10/40	0.8
40	R	20/30	2
41	A	20/30	2
42	C	10/40	2
43	A	10/40	2
44	B	10/40	2
45	R	10/40	2
46	B	20/30	2
47	C	20/30	2
50	A	20/30	4
51	B	20/30	4
52	A	10/40	4
53	B	10/40	4
54	C	20/30	4
55	R	20/30	4
56	C	10/40	4
57	R	10/40	4

Nullmessung vom 26. + 27.07.2007																										
Probekörper			Widerstand (in Ω) und Spannung (in mV)																							
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	10			40			20			30														
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c												
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV						
21	0	10/40	687	-30	729	39	700	22	554	29	592	33	547	35												
22	0	10/40	515	-5.2	513	-18	591	43	378	30	441	34	397	25												
23	0	20/30													446	13	440	18	475	20	422	-15	415	15	425	18
24	0	20/30													442	36	445	26	441	34	425	46	442	45	400	32
25	0	10/40	528	40	540	37	563	40	328	42	365	37	394	40												
26	0	20/30													475	24	487	21	447	19	497	11	462	5	433	12
30	0.8	10/40	380	-158	388	-173	376	-121	267	-155	275	-93	264	-87												
31	0.8	10/40	386	-193	412	-174	450	-173	271	-117	289	-125	276	14												
32	0.8	20/30													471	-199	470	-172	456	-165	419	-168	406	-158	419	-87
33	0.8	20/30													464	-132	440	-228	497	-121	448	6.5	443	-130	441	-147
34	0.8	20/30													434	-174	419	-196	467	-138	383	39	412	-167	411	-118
35	0.8	20/30													487	-117	504	-156	508	-165	438	35	433	-34	446	-12
36	0.8	10/40	512	-192	467	-167	508	-129	358	-188	388	-147	409	-134												
37	0.8	10/40	666	-156	567	-168	561	-162	568	-79	596	-45	516	-12												
40	2	20/30													391	-309	340	-238	364	-290	317	-247	323	-207	329	-141
41	2	20/30													362	-94	349	-76	385	-45	314	-113	339	19	351	-94
42	2	10/40	334	-152	292	-200	308	-159	211	-149	218	-84	242	-90												
43	2	10/40	426	-210	373	-292	366	-325	279	-214	272	-76	282	-166												
44	2	10/40	365	-258	347	-214	368	-270	255	-260	283	-166	283	-160												
45	2	10/40	304	-276	326	-221	332	-291	272	-233	255	-195	266	-252												
46	2	20/30													233	-92	240	-151	267	-131	212	-94	230	-119	234	67
47	2	20/30													279	-225	279	-198	290	-227	244	-158	285	-221	260	-204
50	4	20/30													174	-320	168	-356	200	-295	165	-321	166	-310	182	-317
51	4	20/30													181	-284	175	-307	188	-304	177	-310	171	-271	172	-302
52	4	10/40	181	-284	191	-326	192	-324	143	-295	158	-330	176	-247												
53	4	10/40	201	-240	220	-230	226	-220	164	-199	156	-211	83	-213												
54	4	20/30													162	-301	169	-238	180	-281	153	-286	154	-309	174	-290
55	4	20/30													199	-312	193	-324	224	-288	168	-284	178	-242	179	-308
56	4	10/40	212	-225	199	-233	216	-255	149	-207	152	-255	156	-227												
57	4	10/40	225	-267	204	-290	237	-264	173	-240	180	-195	172	-276												

1. Messung vom 21. + 24.09.2007																										
Probekörper			Widerstand [Ω] und Spannung [mV]																							
Nr.	Chlorid, M.%/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30					
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c	
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV
21	0	10/40	694	-40	775	34	758	32	571	32	655	29	613	28												
22	0	10/40	792	5	778	19	925	40	544	35	666	37	594	38												
23	0	20/30													645	15	676	18	725	23	622	5	630	19	655	24
24	0	20/30													654	30	679	4	688	36	621	38	667	38	618	26
25	0	10/40	771	5	816	27	874	31	477	34	559	29	621	34												
26	0	20/30													707	33	760	12	688	29	731	31	691	14	663	30
30	0.8	10/40	552	-113	590	-36	557	-116	362	12	360	-136	358	-73												
31	0.8	10/40	568	11	614	-7	624	-45	381	-33	383	-22	388	38												
32	0.8	20/30													479	-141	470	-6	453	0	405	-28	397	16	429	25
33	0.8	20/30													483	-21	465	-134	490	43	435	9	424	-44	436	-24
34	0.8	20/30													427	-56	418	-43	463	-5	388	42	396	6	408	-127
35	0.8	20/30													502	-17	488	-77	522	48	429	81	432	27	451	51
36	0.8	10/40	533	-30	477	-28	541	32	331	-40	364	21	388	-56												
37	0.8	10/40	689	106	591	86	600	94	525	57	562	53	496	94												
40	2	20/30													376	-331	366	-220	394	-308	326	-231	351	-138	358	-70
41	2	20/30													389	-85	386	-74	437	25	324	-61	343	-90	374	-92
42	2	10/40	479	-35	423	-75	439	-109	330	-47	327	-86	357	58												
43	2	10/40	504	-298	490	-283	522	-271	354	-123	358	-38	370	-259												
44	2	10/40	461	-225	461	-253	495	-288	329	-203	362	-264	352	-212												
45	2	10/40	411	-248	442	-253	458	-289	367	-306	321	-128	349	-120												
46	2	20/30													349	-451	355	-191	402	-166	320	28	339	-115	348	-21
47	2	20/30													434	-295	420	-199	446	-248	364	-148	422	-202	382	-234
50	4	20/30													254	-315	254	-376	302	-295	266	-320	253	-305	281	-357
51	4	20/30													284	-287	275	-326	303	-315	272	-327	258	-241	261	-290
52	4	10/40	281	-294	303	-330	293	-319	222	-289	241	-312	275	-250												
53	4	10/40	317	-263	336	-248	360	-221	253	-182	238	-211	245	-225												
54	4	20/30													248	-304	253	-176	271	-312	236	-274	232	-321	271	-301
55	4	20/30													302	-348	288	-364	340	-325	251	-298	266	-277	260	-360
56	4	10/40	323	-246	313	-258	327	-301	230	-242	229	-297	243	-254												
57	4	10/40	361	<u>-275</u>	326	<u>-276</u>	382	<u>-240</u>	265	<u>-199</u>	274	<u>-194</u>	260	<u>-273</u>												

2. Messung vom 01. + 02.04.2008

Probekörper			Widerstand [Ω] und Spannung [mV]																							
Nr.	Chlorid, M.%/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30					
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c	
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV
21	0	10/40	1'300	6	1'447	-34	1'352	6	984	11	1'104	-96	1'030	-75												
22	0	10/40	1'373	7	1'277	-17	1'596	14	933	-91	1'115	13	956	-26												
23	0	20/30													1'134	7	1'212	4	1'224	-2	1'061	-51	1'057	-2	1'054	6
24	0	20/30													1'132	-35	1'174	-39	1'153	-40	1'102	14	1'150	15	1'024	10
25	0	10/40	1'453	-66	1'468	-19	1'479	7	792	13	928	-16	1'015	-4												
26	0	20/30													1'219	13	1'266	8	1'098	12	1'253	13	1'169	13	1'100	3
30	0.8	10/40	1'056	5	1'039	-7	1'011	-1	713	-6	688	-30	670	-37												
31	0.8	10/40	1'075	14	1'126	4	1'059	9	730	-6	738	-24	729	15												
32	0.8	20/30													837	-68	926	-23	872	-9	786	-2	765	12	813	9
33	0.8	20/30													937	-2	769	-116	913	-2	844	-9	814	1	814	-112
34	0.8	20/30													849	70	810	65	890	96	776	38	761	71	756	49
35	0.8	20/30													1'000	13	906	12	962	31	849	5	845	-2	848	46
36	0.8	10/40	1'071	1	933	9	992	11	656	-42	708	-21	725	-7												
37	0.8	10/40	1'362	23	1'133	19	1'145	14	1'016	1	1'098	5	932	-13												
40	2	20/30													489	-316	489	-157	527	-194	452	-163	480	-119	463	-106
41	2	20/30													491	-129	483	-120	564	-56	423	-102	493	-74	497	-81
42	2	10/40	636	-134	615	-95	615	-206	468	-81	434	-82	483	-40												
43	2	10/40	664	-325	654	-233	656	-299	456	-123	506	-57	475	-131												
44	2	10/40	597	-190	637	-207	625	-315	462	-149	576	-166	484	-118												
45	2	10/40	557	-197	582	-345	611	-205	487	-210	446	-77	469	-139												
46	2	20/30													511	-47	465	-169	521	-254	433	-78	463	-98	489	14
47	2	20/30													612	-234	565	-112	612	-165	455	-112	575	-138	501	-146
50	4	20/30													338	-293	306	-332	347	-270	379	-267	305	-253	384	-294
51	4	20/30													347	-261	310	-304	407	-279	311	-319	349	-219	349	-254
52	4	10/40	378	-289	383	-329	408	-280	312	-241	319	-329	353	-253												
53	4	10/40	408	-289	449	-252	471	-257	345	-157	299	-190	346	-199												
54	4	20/30													321	-308	360	-158	299	-343	318	-263	272	-333	323	-321
55	4	20/30													411	-342	396	-357	470	-313	338	-299	384	-283	310	-361
56	4	10/40	445	-271	464	-192	429	-298	332	-212	309	-310	348	-225												
57	4	10/40	490	-249	468	-253	550	-132	391	-126	386	-211	366	-189												

3. Messung vom 05.08.2008																										
Probekörper			Widerstand [Ω] und Spannung [mV]																							
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30					
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c	
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV
21	0	10/40	1'061	-0.4	1'037	3	1'019	3	872	18	983	18	917	17												
22	0	10/40	1'738	29	1'634	25	3'320	22	941	29	1'091	31	967	31												
23	0	20/30													1'100	10	1'087	14	1'190	14	1'012	12	1'005	12	1'013	16
24	0	20/30													1'131	26	1'159	30	1'099	30	1'077	34	1'215	31	1'041	27
25	0	10/40	970	-25	1'087	-11	1'110	19	486	27	589	26	665	30												
26	0	20/30													798	29	868	30	790	26	828	29	795	28	793	-7
30	0.8	10/40	738	29	752	26	713	-31	536	45	537	-144	503	-151												
31	0.8	10/40	672	43	762	42	751	42	417	19	448	26	472	35												
32	0.8	20/30													685	-19	677	87	678	83	599	85	591	96	676	95
33	0.8	20/30													871	35	805	18	861	33	721	27	687	30	709	-48
34	0.8	20/30													537	70	534	66	620	95	453	85	479	66	498	59
35	0.8	20/30													921	6	818	-16	887	6	841	4	814	2	878	10
36	0.8	10/40	902	6	796	-12	891	11	496	-24	550	-172	596	-12												
37	0.8	10/40	1'139	72	987	64	958	-56	1'142	61	1'151	78	1'010	84												
40	2	20/30													423	-308	438	-63	480	-116	365	-103	403	-51	405	-241
41	2	20/30													498	-33	489	-5	545	99	398	62	448	-150	479	32
42	2	10/40	871	58	708	-39	778	-27	585	6	525	-113	588	50												
43	2	10/40	660	-204	619	-163	690	-127	478	-44	484	-202	464	-68												
44	2	10/40	1'014	-58	901	-103	1'467	-57	446	-178	475	-218	483	-130												
45	2	10/40	578	9	564	-229	603	-159	400	-231	387	-12	412	-164												
46	2	20/30													516	95	533	30	764	-80	453	-61	445	-47	486	110
47	2	20/30													781	-124	604	-24	670	-116	668	-0.2	708	-7	589	-91
50	4	20/30													351	-130	347	-156	361	-167	322	-201	277	-202	314	-254
51	4	20/30													427	-208	388	-206	497	-191	412	-198	313	-205	316	-128
52	4	10/40	304	-39	298	-84	358	-73	238	-170	227	-196	267	-93												
53	4	10/40	602	-33	511	-63	614	-31	288	-43	244	-238	258	-254												
54	4	20/30													419	-140	362	-201	385	-89	331	-121	331	-154	380	-201
55	4	20/30													305	-138	294	-210	310	-115	233	-62	250	-140	226	-154
56	4	10/40	472	-68	404	-147	438	-79	340	-149	279	-146	315	-176												
57	4	10/40	351	-175	322	-195	398	-53	240	-86	238	-246	226	-275												

4. Messung vom 14.10.2008

Probekörper			Widerstand [Ω] und Spannung [mV]																							
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30					
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c	
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV
21	0	10/40	1'255	-1	1'254	15	1'207	13	1'068	21	1'186	22	1'102	21												
22	0	10/40	3'200	8	3'020	6	5'940	3	1'750	6	1'997	7	1'741	7												
23	0	20/30													1'316	12	1'319	15	1'424	17	1'199	14	1'183	15	1'208	19
24	0	20/30													2'058	5	2'175	8	2'132	6	1'917	7	3'070	7	1'730	5
25	0	10/40	1'096	65	1'127	10	1'141	14	692	27	780	25	918	28												
26	0	20/30													1'037	28	1'047	28	950	25	1'118	28	1'010	28	983	10
30	0.8	10/40	881	-5	919	2	887	-101	640	18	641	-42	640	-41												
31	0.8	10/40	804	34	857	33	822	32	570	20	573	16	593	29												
32	0.8	20/30													834	-38	813	21	824	13	731	10	709	26	812	24
33	0.8	20/30													1'407	-161	1'246	2	1'352	-160	1'197	5	1'132	13	1'155	-11
34	0.8	20/30													630	71	599	62	684	85	595	82	579	56	598	20
35	0.8	20/30													869	12	788	-41	832	-39	763	-5	775	-19	849	13
36	0.8	10/40	1'520	53	1'319	49	1'513	58	795	53	874	23	949	51												
37	0.8	10/40	1'107	32	970	42	993	-110	933	36	975	39	948	29												
40	2	20/30													400	-359	466	-142	532	-151	437	-120	469	-160	485	-145
41	2	20/30													581	-63	570	69	662	-134	460	54	526	-38	559	68
42	2	10/40	879	116	706	6	845	18	515	43	479	-103	574	-137												
43	2	10/40	852	-147	787	-95	883	-104	547	-296	557	-179	540	-266												
44	2	10/40	1'532	-26	1'335	-66	2'587	7	702	-29	761	-92	735	-12												
45	2	10/40	641	-63	619	-298	684	-292	526	-233	478	-63	504	-184												
46	2	20/30													792	-2	801	-95	1'136	-60	686	28	654	0	750	-223
47	2	20/30													595	-184	572	-180	616	-117	606	-144	625	17	521	-84
50	4	20/30													353	-99	369	-136	354	-166	341	-229	313	-151	357	-183
51	4	20/30													573	-196	482	-161	728	-126	565	-156	450	-162	482	-69
52	4	10/40	316	-40	265	-167	299	-121	276	-176	280	-210	335	-87												
53	4	10/40	920	-27	730	-66	941	9	455	-72	382	-218	398	-228												
54	4	20/30													310	-191	314	-221	256	-179	265	-163	286	-207	306	-256
55	4	20/30													366	-197	418	-259	391	-158	307	-107	328	-172	286	-244
56	4	10/40	331	-128	293	-174	294	-113	308	-144	263	-152	300	-176												
57	4	10/40	407	-250	419	-275	516	-205	374	-179	358	-230	279	-332												

Schlussmessung vom 17.09.2009																										
Probekörper			Widerstand [Ω] und Spannung [mV]																							
Nr.	Chlorid, M. %/Z	Überdeck., mm	10						40						20						30					
			a		b		c		a		b		c		a		b		c		a		b		c	
			Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV	Ω	mV
21	0	10/40	1'954	4	1'919	12	1'822	11	1'652	18	1'785	17	1'580	14												
22	0	10/40	2'905	17	2'881	11	4'680	11	1'948	17	2'226	19	1'966	19												
23	0	20/30													2'011	4	1'972	8	2'006	10	1'871	7	1'694	6	1'666	9
24	0	20/30													1'204	16	1'633	24	1'495	20	1'206	23	1'701	29	1'151	20
25	0	10/40	2'464	-72	2'648	-99	2'220	103	1'418	102	1'444	132	1'648	93												
26	0	20/30													2'125	109	1'998	95	1'646	112	2'637	103	1'950	102	1'904	70
30	0.8	10/40	1'347	23	1'287	-23	1'237	-81	982	50	927	43	889	42												
31	0.8	10/40	1'426	40	1'549	-4	1'423	42	982	13	968	35	972	17												
32	0.8	20/30													1'291	117	1'232	114	1'247	107	1'124	101	1'041	118	1'145	111
33	0.8	20/30													1'433	-5	1'261	16	1'357	-145	1'289	14	1'179	14	1'185	13
34	0.8	20/30													1'123	65	1'011	61	1'163	69	1'042	97	932	28	950	43
35	0.8	20/30													1'214	23	1'060	-27	1'098	11	1'106	5	1'096	6	1'049	13
36	0.8	10/40	1'408	-22	1'150	-24	1'434	20	843	13	768	14	840	-46												
37	0.8	10/40	1'337	18	1'190	8	1'183	2	1'235	35	1'289	45	1'278	49												
40	2	20/30													609	52	715	173	796	162	698	162	704	127	723	154
41	2	20/30													859	-35	780	40	883	-93	725	93	715	-13	742	54
42	2	10/40	877	-114	736	56	996	59	691	53	602	-98	730	8												
43	2	10/40	1'161	-94	1'191	27	1'329	11	842	-77	833	-2	796	-204												
44	2	10/40	1'103	18	1'063	-195	2'070	59	773	37	776	7	764	-175												
45	2	10/40	1'034	25	876	-123	930	-268	921	-63	736	-288	727	-52												
46	2	20/30													753	-77	746	5	855	-91	732	40	649	18	641	-246
47	2	20/30													568	-131	563	118	622	68	703	128	753	171	567	120
50	4	20/30													352	-46	361	-63	317	-118	307	-240	251	-136	331	-233
51	4	20/30													344	-241	430	-153	451	-183	286	-181	284	-212	285	-119
52	4	10/40	289	152	320	18	371	55	270	-120	260	-5	323	38												
53	4	10/40	512	124	425	50	562	214	462	140	264	-140	304	-169												
54	4	20/30											232		280	-70	244	-171	393	-41	227	-145	249	-143	256	-201
55	4	20/30													649	-55	617	-218	513	-105	454	-20	423	-149	388	-169
56	4	10/40	308	-62	286	-175	289	-88	236	-152	192	-141	232	-140												
57	4	10/40	528	-108	514	-86	579	-154	450	-52	352	-148	294	-197												

Literaturverzeichnis

Al-Mehthel 2009	M. Al-Mehthel, S. Al-Dulaijan, S.H. Al-Idi, M. Shameem, M.R. Ali and M. Maslehuddin, Performance of generic and proprietary corrosion inhibitors in chloride-contaminated silica fume cement concrete, Construction and Building Materials, Volume: 23, Issue 5, May, 2009, p. 1768-1774.
ASTM 2005	ASTM, Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments, ASTM, Designation G 109-99a, 2005, p. 1-6.
Baublatt 1999	Korrosionsinhibitor zum Schutz des Stahlbetons – Fassadensanierung bei der St.-Mauritius-Kirche Dornach SO, Schweizer Baublatt, Nr. 54, 9. Juli 1999. S. 30-31.
Bavarian 2003	B. Bavarian, L. Reiner, Corrosion Protection of Steel Rebar in Concrete with Optimal Application of Migrating Corrosion Inhibitors MCI 2022, March 2003, p. 1-13.
Bavarian 2007	Bavarian B., Reiner L, Corrosion protection of steel rebar in concrete using migrating corrosion inhibitors, in: Corrosion of reinforcement in concrete – Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques, Editors: Raupach M. ; Elsener B. ; Polder R. Mietz J., European Federation of Corrosion publications, Number 38, Woodhead Publishing, Abington, 2007, p. 239-249.
Bennett 2005	J.E. Bennett, Investigation of Protectosil® CIT to mitigate corrosion of reinforced Concrete using modified ASTM G-109 Procedure, J. E. Bennett Consultants, Inc., 18.5.2005, p. 1-6.
Benzina 2008	L. Benzina Mechmeche, L. Dhouibi, M. Ben Ouezdou, E. Triki, F. Zucchi, Investigation of the early effectiveness of an amino-alcohol based corrosion inhibitor using simulated pore solutions and mortar specimens, Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 3, March 2008, p. 167-173.
Bolzoni 2001	F. Bolzoni, G. Fumagalli, L. Lazzari, M. Ormellese, M.P. Pedferri, Mixed-in inhibitors for concrete structures, Proc. of the European Corrosion Congress EUROCORR 2001, Riva del Garda, Italy, 30.09. - 04.10.2001.
Bolzoni 2007	F. Bolzoni, G., Fumagalli L. Lazzari, M. Ormellese, M.P. Pedferri, Mixed-in inhibitors for concrete structures, in: Corrosion of reinforcement in concrete – Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques, Editors: M. Raupach, B. Elsener; R. Polder and J. Mietz, European Federation of Corrosion publications, Number 38, Woodhead Publishing, Abington, 2007, p. 185-202.
Brühwiler 1999a	E. Brühwiler, Verification of corrosion inhibition by measuring in-situ corrosion rate, COST 521, CH 4 Project Report 1998/1999.
Brühwiler 1999b	E. Brühwiler und P. Plancherel, Instandsetzung von Sichtbetonfassaden mit Inhibitoren, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 26, 1999, S. 7-10.
Bucher 2009	R. Bucher, Meteostation, Niederlenz, http://www.wetterstation-niederlenz.ch/wetterarchiv.html .
Büchler 2005	M. Büchler, Y. Schiegg Y. und S. Giessler, Kontrolle der Wirksamkeit der Korrosionsschutzwirkung eines Inhibitors durch Online Monitoring, Beton- und Stahlbeton, Vol. 100, Heft 10, 2005, S. 897-900.

CEN 2006	SN EN 1504-9:2006, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 9: Allgemeine Anwendungsregeln für Produkte und Systeme.
CEN 2007	SN EN 14629:2007, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehaltes von Festbeton.
Civjan 2003	S.A. Civjan, J.M. LaFave, D. Lovett, D.J. Sund and J. Trybulski, Performance evaluation and economic analysis of combinations of durability enhancing admixtures (mineral and chemical) in structural concrete for the northeast U.S.A., New England Transportation Consortium, NETCR36, Project No. 97-2, Febr. 2003.
Cusson 2006	D. Cusson, S. Qian and T. Hoogeveen, Field performance of concrete repair systems on highway bridge, ACI Materials Journal, Vol. 103, 2006, p. 366-373.
DAfStb 2001	Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie): Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze. Teil 2: Bauprodukte und Anwendung. Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung. Teil 4: Prüfverfahren. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Berlin (Herausgeber), Oktober 2001.
Dietrich 1997	Wirtschaftliche Alternative zur Sichtbetoninstandsetzung – Betonschutz und -instandsetzung mit neuem Korrosionsinhibitor, Schweizer Baublatt, Nr. 30, 1997, S. 32-36. Anwendungsbeispiele, Schweizer Baublatt, Nr. 32, 1997, S. 32-36.
Dietrich 1998	Oberflächenschutzmassnahmen und Korrosionsinhibitoren für bewitterte Stahlbetonkonstruktionen, Chimia, 52, 1998, S. 212-217.
Distlehorst 2007	J. A. Distlehorst and J.B. Wojakowski, The effects of DSS corrosion inhibitor on physical characteristics of concrete, Kansas Department of Transportation, Report No. FHWA-KS-07-2, March 2007.
Elsener 1999a	B. Elsener, M. Büchler and H. Böhni, Organic corrosion inhibitors for steel in concrete, EUROCORR 1999, Aachen, p. 1-16.
Elsener 1999b	B. Elsener, M. Büchler, F. Stalder and H. Böhni, Migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete: Part 1 - Prevention of corrosion, Corrosion, Vol. 55, Nr. 12, p. 1155-1163.
Elsener 2000	B. Elsener, M. Büchler, F. Stalder, H. Böhni, Migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete: Part 2 - Inhibitor as repair strategy, Corrosion, Vol. 56, Nr. 7, p. 727-732.
Elsener 2007	B. Elsener, Corrosion inhibitors for reinforced concrete – an EFC state of the art report, in: Corrosion of reinforcement in concrete – Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques, Editors: M. Raupach, B. Elsener; R. Polder and J. Mietz, European Federation of Corrosion, Publications Number 38, Woodhead Publishing, Abington, 2007, p. 170-184.
Fedrizzi 2005	L. Fedrizzi, F. Azzolini, P.L. Bonora, The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides, Cement and Concrete Research, Vol 35, 2005, p. 551–561.
FHWA 2001	R. Liu and J. Olek, Development and evaluation of cement-based patching materials for repair of corrosion-damaged reinforced concrete slabs, Joint transportation research program, C36-37HH, May 2001.
FHWA 2002	M. Islam, A.A. Sohaghpurwala and W.T. Scannell, Long-term performance of corrosion inhibitors used in repair of reinforced concrete bridge components, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-01-097, 2002.

Gassner 1996	P. Gassner und B. Malric, MFP, Natrium-Mono-Fluoro-Phosphat – Korrosionsinhibitor, Betoninstandsetzung mit MFP, Seminar 24. Okt. 1996, Locher & Cie AG, Zürich, 1996.
Gerdes 1998	A. Gerdes und F.H. Wittmann, Chemische Stabilität von Natriummofluorophosphat in der Porenlösung des Betons, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4. Jahrgang, 1998, S. 423-434.
Grantham 2005	M. Grantham, M. Gray, U. Schneck, Evaluation of corrosion inhibitors for remediation of St. Mary's multi-storey car park Colchester, Repair and Renovation of Concrete Structures, 2005, p. 269-277.
Heiyantuduwa 2005	R. Heiyantuduwa, M.G. Alexander, J.R. Mackechnie and T. Rylands, Performance of an organic corrosion inhibitor in concrete affected by both chloride and carbonation-induced corrosion, Proc. 1 st International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, 21-23 November 2005, Editors: M. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn & P. Moyo, Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2006.
Heiyantuduwa 2006	R. Heiyantuduwa, M. G. Alexander, and J. R. Mackechnie, Performance of a penetrating corrosion inhibitor in concrete affected by carbonation-induced corrosion, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 6, November/December 2006, p. 842-850.
Holloway 2004	L. Holloway, K. Nairn, M. Forsyth, Concentration monitoring and performance of a migratory corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete, Cement and Concrete Research Vol. 34, 2004, p. 1435-1440.
Hunkeler 1998	F. Hunkeler, Instandsetzung von Stahlbetonbauten - Einsatz von Inhibitoren, Schulungsunterlagen TFB, Veranstaltung 4820, 1998.
Hunkeler 2001	F. Hunkeler, H. Ungricht und Y. Schiegg, Eignung zweier Inhibitoren (MFP und Sika FerroGard-903) zur Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauten, Objektbezogener Forschungsauftrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, UVEK/ASTRA, Bericht VSS Nr. 554, Juni 2001.
Hunkeler 2005	F. Hunkeler, H. Ungricht und B. Mühlán, A13c Compognabrücke bei Thuisis, Schlussbericht TFB U 983109-2, Januar 2005.
ibac 2001	C. Dauberschmidt, Untersuchungen zur Wirksamkeit und Unschädlichkeit von Korrosionsinhibitoren, F 468, ibac, Aachen, 2001, http://www.ibac.rwth-aachen.de/institut/ag5/ , http://www.ibac.rwth-aachen.de/forschung/docs/F468.pdf .
ICRI 2009	STAP SA, Structural Rehabilitation of a Chloride-Contaminated Concrete Silo in the Azores. STAP SA, International Concrete Repair Institute (ICRI), 2009; http://www.icri.org/AWARDS/2009/2009.asp , 20.12.2009.
Internet 2004a	Field evaluation of concrete containing disodium tetrapropenyl succinate (DSS), Division of Research ConnDOT, Transportation Research Highlights, http://www.ct.gov/dot/cwp/view.asp?a=1387&q=259640 .
Internet 2004b	C.L. Page, Corrosion inhibitors in concrete repair systems, http://www.leeds.ac.uk/civil/ceci/materials/cemu-research.html .
Keller 1997	T. Keller und F. Hunkeler, ASB-Arbeitsgruppe "Behandlung von chloridbelastetem Beton", Instandsetzung von chloridbelastetem Beton – Resultate eines Versuches mit dem Produkt Teveka SF, Schlussbericht vom 22.10.1997.
Lee 2007	H.-S. Lee, S.-W. Shin, Evaluation on the effect of lithium nitrite corrosion inhibitor by the corrosion sensors embedded in mortar, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, p. 1–6.

Maeder 2005	U. Maeder, F. Wombacher and B. Marazzani, Concrete repair strategies including surface-applied corrosion inhibitors, Proc. 1 st International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, 21-23 November 2005, Editors: M. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn & P. Moyo, Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2006.
Malric 1995	B. Malric, Assainissement du pont de Peney (Genève), IAS, Vol. 121, No. 20, Sept. 1995, p. 391-395. Weitere Informationen: www.mfp-sa.com .
Malric 1996	B. Malric und P. Gassner, Korrosionsbekämpfung im Stahlbeton mit Inhibitoren auf MFP-Basis, Erhaltung von Brücken - Aktuelle Forschungsergebnisse, SIA Dokumentation D 0129, 1996.
Miksic 2009	B. Miksic, J. Jackson Meyer, A. Furman and M. Hanson, New trends in migrating corrosion inhibitor technology for corrosion protection of embedded steel reinforcement, Cortec Corporation, http://www.cortecmci.com/Files/NewestInMCI.pdf , 20.12.2009.
Morlidge 2005	J. R. Morlidge, The use of surface applied FerroGard 903 corrosion inhibitor to delay the onset of chloride induced corrosion in hardened concrete, BRE Client report no. 224-346, August 2005, p.1-34.
Morris 2002	W. Morris and M. Vázquez, A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides, Cement and Concrete Research, Vol. 32, Issue 2, February 2002, p. 259-267.
Morris 2003	W. Morris, A. Vico and M. Vázquez, The performance of a migrating corrosion inhibitor suitable for reinforced concrete, Journal of Applied Electrochemistry 33, 2003, p. 1183–1189.
Mott 2003	N.J.R. Baldwin and E.S. King, Field studies of the effectiveness of concrete repair, Phase 4 Report: Analysis of the effectiveness of concrete repairs and project findings, Mott MacDonald Ltd., Research report 186, 2003.
Mulheron 2000	M. Mulheron and S.O. Nwaubani, Corrosion inhibitors for high performance reinforced concrete structures, Proc. RILEM Int. Conf. On Role of Admixtures in High Performance Concrete, Monterrey, Mexico, 2000.
Ngala 2002	V.T. Ngala, C.L. Page and M.M. Page, Corrosion inhibitor systems for remedial treatment of reinforced concrete. Part 1: calcium nitrite, Corrosion Science, Vol. 44, Issue 9, September 2002, p. 2073-2087. Nur Abstract vorhanden
Ngala 2004	V.T. Ngala, C.L. Page, M.M. Page, Investigations of an ethanolamine-based corrosion inhibitor system for surface treatment of reinforced concrete, Materials and Corrosion, Volume: 55, Issue 7, 2004, p. 511-519.
NJ DOT 2008	MAP Number: 111, Procedure for approval of corrosion inhibitor for use as an admixture in concrete, New Jersey Department of Transportation, Bureau of Materials Materials Approval Procedures, Jan. 2008.
Ormellese 2006	M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni, T. Pastore, Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 3, March 2006, p. 536-547.
Page 2000	C.L. Page, V.T. Ngala and M.M. Page, Corrosion inhibitors in concrete repair systems, Magazine of concrete research, No. 1, Febr. 2000, p. 25-37.

Prabakar 2009	J. Prabakar, P. D. Manoharan, M. Neelamegam, Performance evaluation of concrete containing sodium nitrate inhibitor, Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), 6-9 September 2009, Bath, UK, Paper 182.
Raupach 2007	Corrosion of reinforcement in concrete – Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques, Editors: Raupach M. ; Elsener B. ; Polder R. Mietz J., European Federation of Corrosion publications, Number 38, Woodhead Publishing, Abington, 2007.
Richardson 2006	M.G. Richardson, E. Grimes, C. McNally, T.A. Söylev, Significance of the concentration of chloride in the repair of concrete highway structures using surface applied corrosion inhibitors, Proc. 1 st International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, 21-23 November 2005, Editors: M. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn & P. Moyo, Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2006, p. 837-842.
Rota 1999	A. Rota und D. Flückiger, Monitoring nach der Sichtbetoninstandsetzung mit Inhibitoren, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 26, 1999, S. 10-14.
Samaris 2003	A. Znidaric, J.M. Piau und R. Woodward, SAMARIS – Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure, Inception report, 30.6.2003.
Samaris 2004	SAMARIS Management Group, Competitive and Sustainable Growth (Growth) Programme, Samaris – Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure, Mid-term report, 7.9.2004.
Samaris 2006a	SAMARIS – Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure (CD), Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme, Final Reports, July 2006.
Samaris 2006b	SAMARIS – Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure (CD), Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme, Final Reports, July 2006. Deliverable D21, Test of effectiveness of corrosion inhibitors in field trials.
Samaris 2006c	SAMARIS – Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure (CD), Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme, Final Reports, July 2006. Deliverable D25a, Specification for the use of corrosion inhibitors for the rehabilitation of concrete highway structures.
Schiegg 2002	Y. Schiegg, Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten, Diss. ETH Nr. 14583, 2002.
Schiegg 2007	Y. Schiegg, F. Hunkeler and H. Ungricht, Effectiveness of corrosion inhibitors - a field study, in: Corrosion of reinforcement in concrete – Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques, Editors: M. Raupach, B. Elsener, R. Polder and J. Mietz, European Federation of Corrosion publications, Number 38, Woodhead Publishing Ltd., Abington Cambridge, 2007, p. 226-238.
Schiessl 2002	P. Schiessl and C. Dauberschmidt, Evaluation fo calcium nitrite as a corrosion inhibitor, iiC, I/2002, p. 82-96.
Schmalz 1993	P. Schmalz, B. Malric, Korrosionsbekämpfung im Stahlbeton durch Inhibitoren auf MFP-Basis, Erhaltung von Brücken - Aktuelle Forschungsergebnisse, SIA Dokumentation D 099, 1993.
SGK 2007	Y. Schiegg und M. Büchler, Untersuchung von Korrosionsinhibitoren, Bericht SGK Nr. 06'027-1, 11.12.2007. (offiziell von Evonik erhalten, März/April 2010).

SGK 2009	D. Bindschedler und Y. Schiegg, Feldversuch Sika FerroGard-901 – Zwischenbericht Messungen 2008, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz Bericht Nr. 08'077, 7.4.2009, S. 1-4.
Sharp 2004	S. R. Sharp, Final Report – Evaluation of two Corrosion Inhibitors Using two Surface Application Methods for Reinforced Concrete Structures, Virginia Transportation Research Council, December 2004, p. i-iii + 1-2.
Söylev 2007	T.A. Söylev, C. McNally and M. Richardson, Effectiveness of amino alcohol-based surface-applied corrosion inhibitors in chloride-contaminated concrete. <i>Cement and Concrete Research</i> , Vol. 37, Issue 6, June 2007, p. 972-977.
Soylev 2008	T.A. Soylev, M.G. Richardson, Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report, <i>Construction and Building Materials</i> , Volume 22, Issue 4, April 2008, p. 609-622.
Sprinkel 2003	M.M. Sprinkel, Evaluation of corrosion inhibitors for concrete bridge deck patches and overlays, Virginia Transportation Research Council, VTRC 03-R14, Final Report, June 2003.
Standke 2002	B. Standke, Neues Verfahren zur drastischen Senkung aktiver Korrosion in Stahlbeton, <i>Bautenschutz VBK</i> , Nr. 1, 2002, S. 21-25.
Stanish 2006	K.D. Stanish and M.G. Alexander, The use of penetrating corrosion inhibitors as a treatment for structures corroding due to chloride ingress, Proc. 1 st International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, 21-23 November 2005, Editors: M. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn & P. Moyo, Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2006.
Stephenson 2009	L. D. Stephenson and A. Kumar, Corrosion prevention of rebar in concrete in highly corrosive environments, <i>Department of Defense, Corrosion Conference 2009</i> , August 10-14, 2009, Washington DC.
VDOT 2003a	B.D. Chambers, S.R. Taylor and D.S. Lane, An evaluation of new inhibitors for rebar corrosion in concrete, Virginia Transportation Research Council, Final Report VTRC 03-R8, March 2003.
VDOT 2003b	M.M. Sprinkel, Evaluation of corrosion inhibitors for concrete bridge deck patches and overlays, Virginia Transportation Research Council, VTRC 03-R14, Final Report, June 2003.
Yongmo 2004	X. Yongmo, S. Hailong and B.A. Miksic, Comparison of inhibitors MCI and NaNO ₂ in carbonation-induced corrosion, <i>Materials Performance</i> , January, 2004, p. 42-46.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 24.7.2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2002/016

Projekttitel: Korrosionsinhibitoren für die innovative und kosteneffiziente Instandsetzung von chloridverseuchten Stahlbetonbauten

Enddatum: 31.5.2010

Projektleiter

Name:

Amt, Firma, Institut:

Strasse, Nr.:

PLZ:

Ort:

Kanton, Land:

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

In Anbetracht der wirtschaftlichen und technischen Bedeutung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten ist es zwingend, dass weltweit nach innovativen Lösungen für kosteneffiziente Instandsetzungen gesucht wird. Der Einsatz von Inhibitoren könnte eine solche Lösung darstellen, da der in der Regel erforderliche aufwendige Betonersatz minimiert oder sogar ganz wegfallen könnte.

Der Schwerpunkt dieses Forschungsauftrages lag bei der Evaluation, der Prüfung und Beurteilung von Inhibitoren zur Instandsetzung von chloridverseuchtem Stahlbetonbauten. Die Korrosion der Bewehrung wegen karbonatisiertem Beton war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Basierend auf der Vorevaluation (Literaturrecherche, Kontakte zu Anbietern, eigene Erfahrungen) und der Vorprüfung (Haftzugfestigkeit) wurden drei Inhibitorsysteme vertieft geprüft. Diese wurden nach einer 8-monatigen Vorlagerung auf die bewehrten chloridverseuchten Prüfkörper aufgebracht (Chloridgehalt 0, 0,8, 2 und 4 M.%/Z). Danach wurden die Prüfkörper für weitere 13 Monate der Bewitterung ausgesetzt.

Die umfangreichen korrosionstechnischen Messungen vor und nach der Instandsetzung sowie die visuelle Beurteilung der ausgebauten Stahlstäbe führten zur Erkenntnis, dass keines der drei geprüften Inhibitorsysteme die laufende Korrosion an der Bewehrung zu reduzieren vermochte. Diese Aussage gilt selbst bei der sehr geringen Überdeckung von nur 10 mm.



	<p>Bei allen geprüften Systemen konnten eine erhebliche Diffusion (Wanderung) der Chloride aus dem Untergrund (Altbeton) in den neuen Instandsetzungsmörtel festgestellt werden.</p> <p>Dieses ernüchternde Resultat ist mit einiger Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass sich das Korrosionsmedium in unmittelbarer Umgebung des Stahls bei laufender Korrosion stetig ändert (verschärft) und die sich entwickelnden Korrosionsprodukte zusätzliche chemische und physikalische Hindernisse darstellen und so verhindern, dass der Inhibitor in ausreichender Konzentration an die Stahloberfläche gelangen und seine Wirkung entfalten kann. Es kann zudem auch sein, dass die gewählten Chloridgehalte von 2 und 4 M.%/Z zu hoch angesetzt waren bzw. die dadurch verursachte Korrosion zu intensiv war. Sika beispielsweise hält in ihrem Produktdatenblatt fest, dass SikaFerroGard-903 bei Chloridgehalten über 1 M.%/Zement nicht eingesetzt werden sollte.</p> <p>Die Ergebnisse der durchgeführten praxisnahen Laborversuche decken sich nur mit einem Teil der Literatur. Insgesamt sind die Literaturergebnisse sehr widersprüchlich und vermitteln eher ein optimistischeres Bild.</p> <p>Es ist möglich, dass dann, wenn die Bewehrung noch nicht oder nur wenig korrodiert, die Anwendung von Inhibitoren eher erfolgreich ist und dabei die Höhe des Chloridgehaltes eine geringere Rolle spielt. Diese Situation wurde hier aber nicht untersucht.</p>
Zielerreichung:	<p>Die Ziele des Forschungsauftrages konnten insofern erreicht werden, als dass es nun möglich ist, klare Vorgaben für eine Laborprüfung zu machen. Ernüchternd ist, dass keines der geprüften Produkte die Erwartungen zu erfüllen vermochte. Diese Erkenntnis ist aber ebenso wichtig, um nicht zielführende Anwendungen zu vermeiden.</p>
Folgerungen und Empfehlungen:	<p>Die Untersuchungen führten zu mehreren für die Praxis relevanten Empfehlungen bzw. Folgerungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> Der Einsatz von Inhibitoren für die Instandsetzung von Stahlbetonbauten, deren Bewehrung durch chloridinduzierte Korrosion bereits stark geschädigt ist, kann nicht empfohlen werden. Zurzeit gibt es dazu keine zielsicher anwendbare Produkte. Vor dem Einsatz von neuen Produkten und Systemen sollten diese vorgängig im Labor geprüft und beurteilt werden. Dazu ist ein standardisiertes Vorgehen zu empfehlen. Für die Untersuchung der Wirkung und der Wirksamkeit von neuen Produkten und Systemen wird ein Vorschlag gemacht (Prüfkörper und Messkonzept). Diese könnte die Basis für eine Normprüfung bilden. Chloridverseuchter Stahlbeton kann durch eine einfache Aufdoppelung mit Mörtel oder Beton nicht instand gesetzt werden, wenn nicht gleichzeitig der Wassereintrag stark reduziert wird.
Publikationen:	<p>Abschlussbericht AGB 2002/016, publiziert als VSS-Bericht unter dem Titel „Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung von chloridverseuchter Stahlbetonbauten“, 2010.</p> <p>Weitere Publikationen sind im tec 21 und im Beton- und Stahlbetonbau geplant.</p>

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	<p>Das Hauptziel des Projektes, nämlich Mittel und Wege für die Beurteilung der Wirkung und Wirksamkeit von Inhibitoren bei chloridverseuchtem Beton zu finden, konnte erreicht werden.</p> <p>Die Erkenntnis, dass keines der heute auf dem Markt angebotenen Produkte die laufende Korrosion zu reduzieren oder sogar zu stoppen vermag, ist in dieser Klarheit neu. Bislang waren Bauherren und Ingenieure vorab auf die Informationen der Anbieter angewiesen.</p> <p>Die durchgeführten Untersuchungen und die Ergebnisse können nicht bzw. nur mit Einschränkungen auf die Korrosion der Bewehrung infolge Karbonatisierung des Betons übertragen werden.</p>
--------------	---



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra


Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Umsetzung:	Die Erkenntnisse des Berichts fliessen direkt in die Praxis ein und helfen dem praktisch tätigen Ingenieur bei der Beurteilung der Einsatzgrenzen von Inhibitoren. Die im Bericht gemachten Vorschläge für die Prüfung können für eine standardisierte Beurteilung von neuen Inhibitoren genutzt werden. Das ASTRA könnte dies z.B. im Rahmen einer Erstprüfung verlangen.
weitergehender Forschungsbedarf:	Zusätzliche Untersuchungen bei Chloridgehalten zwischen 1 und 2 M.%Z und bei unterschiedlicher Intensität der Vorkorrosion sowie beim Auftauchen neuer Produkte und Systeme auf dem Markt. Untersuchungen zum Einsatz bei Korrosion infolge Karbonatisierung des Betons.
Einfluss auf Normenwerk:	Die im Bericht gemachten Vorschläge können ins schweizerische oder europäische Normenwerk einfließen.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Käser	Vorname:	Martin
Amt, Firma, Institut:	Baudirektion des Kt. Zürich, Tiefbauamt		
Strasse, Nr.:	Walcheplatz 2		
PLZ:	8090	Email:	martin.kaeser@bd.zh.ch
Ort:	Zürich	Telefon:	043 259 31 18 / 31 02
Kanton, Land:	Zürich, Schweiz	Fax:	043 259 51 15

Unterschrift Präsident Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Datum
601	AGB 2001/472	Remplacement de ponts sous trafic <i>Brückenersatz unter Verkehr</i>	2006
602	AGB 2001/485	Laboruntersuchungen an fünf ausgebauten Trägern der Autobahnbrücke "Viadotto delle Cantine a Capolago" <i>Etude expérimentale de cinq poutres prélevées sur le pont autoroutier "Viadotto delle Cantine a Capolago"</i>	2006
603	AGB 2002/015	Risiko von Betonabplatzungen infolge Bewehrungskorrosion <i>Risque d'éclatements du béton dû à la corrosion de l'armature</i>	2006
604	AGB 2002/003	Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonwerken <i>Perméabilité à l'air en tant que paramètre caractéristique de la qualité du béton d'enrobage des ouvrages en béton</i>	2006
605	AGB 2000/401	Comportement, Calcul et dimensionnement des tranchées couvertes <i>Verhalten, Berechnung und Bemessung von Tagbautunneln</i>	2006
606	AGB 2001/486	Résistance à l'effort tranchant des poutres précontraintes à âme mince <i>Querkraftwiderstand von vorgespannten Trägern mit dünnen Stegen</i>	2006
607	AGB 2003/017	Evaluation des systèmes existants pour le suivi à long terme des déformations des ponts <i>Beurteilung bestehender Messsysteme für die Langzeiterfassung der Verformungen von Brücken</i>	2006
608	AGB 1998/101	Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch (ZEBRA) <i>Evaluation de l'état de ponts pendant leur démolition (ZEBRA)</i>	2006
610	AGB 2005/025	Instandsetzung von Galerien – Wirkung und Wirksamkeit der ergriffenen Massnahmen <i>Remise en état de galeries - effet et efficacité des mesures réalisées</i>	2007
611	AGB 2002/027	Streuung der Betoneigenschaften in Bauwerken <i>Variabilité des caractéristiques du béton dans les ouvrages</i>	2006
612	AGB 2001/489	Permanente, vorgespannte Boden- und Felsanker: Fluktuationen des elektrischen Widerstands <i>Tirants d'ancrage précontraints en sol et en rocher: Fluctuations de la résistance électrique</i>	2007

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Datum
613	AGB 1997/06 AGB 2001/480	Experimentelle Untersuchung der Lawinenkräfte auf Galeriedächer <i>Recherche expérimentale sur les forces d'avalanches agissant sur les galeries de protection</i>	2007
614	AGB 2002/026	Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern (TEKplus) – Wissenschaftlich, technische Begleitung der Umsetzung in die Praxis <i>Protection temporaire des câbles de précontrainte contre la corrosion (TEKplus) – documentation scientifique et technique de la transposition à la pratique</i>	2007
615	AGB 2002/004	Betoneigenschaften nach SN EN 206-1 <i>Propriétés de Béton selon SN EN 206-1</i>	2007
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten <i>Appréciation et critères d'acceptation des risques dus aux actions extraordinaires pour les ouvrages d'art</i>	2009
618	AGB2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung <i>Bases d'une méthode pour une appréciation comparative des risques</i>	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Ermittlung des Netzrisikos <i>Estimation du risque pour le réseau</i>	2010
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen <i>Efficacité et efficience des interventions</i>	2009
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten <i>Sécurité structurale des ouvrages d'art existants</i>	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Risikobeurteilung für Kunstbauten <i>Appréciation des risques pour les ouvrages d'art</i>	2010
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten <i>Efficacité et efficience des interventions sur les ouvrages d'art</i>	2009
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten <i>Sécurité sur les chantiers d'ouvrages d'art</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt-Nr.	Titel	Datum
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung <i>Caractéristiques des joints de chaussée en bitume-polymère de largeur normale et de grande largeur après forte sollicitation par le trafic</i>	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chloridinduzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit <i>Mesures contre la corrosion induite par les chlorures pour augmenter la durabilité</i>	2008
629	AGB 2003/001 AGB 2005/019	Integrale Brücken- Sachstandsbericht <i>Ponts à culée intégrée</i>	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état des ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts <i>Anwendungen von Ultra-Hochleistung Faserbeton im Brückenbau</i>	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke <i>Systèmes de protection de surface pour les structures en béton</i>	2008
634	AGB 2002/1007	Untersuchungen zur Potentialfeldmessung an Stahlbetonbauten <i>Recherches relatives à la mesure de potentiel sur des structures en béton armé</i>	2008
635	AGB 2004/002	Applicabilité de j'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales <i>Anwendbarkeit von offenporigen Asphaltdeckschichten auf Kunstbauten des nationalen Strassennetzes</i>	2008
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement des ponts routiers <i>Bemessung und Nachweis der Fahrbahnplatten von Strassenbrücken</i>	2009
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du géoradar <i>Georadar zur Auffindung von Chloriden</i>	2009
638	AGB 2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbetonen <i>Causes des fissurations dans les structures en béton armées à haute performance</i>	2008
645	AGB2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat <i>Bases pour l'utilisation de béton de recyclage en granulats de béton</i>	2010