

Chimia 52 (1998) 212–217  
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft  
 ISSN 0009–4293

# Oberflächenschutzmassnahmen und Korrosionsinhibitoren für bewitterte Stahlbetonkonstruktionen

Matthias Dietrich\*

## Surface Treatments and Corrosion Inhibitors for the Protection of Reinforced Concrete Structures

**Abstract.** Reinforced concrete structures exposed to weathering can suffer damage in different ways. Weathering and frost can, for instance, degrade the surface of the concrete or cause spalling. The consequences of rebar corrosion are very serious due to the fact that the load bearing capacity of structures may well be adversely affected. Corrosion of reinforcing steel takes place when the passivated shield of the steel surface has been destroyed by carbonation and/or chlorides.

Surface protection measures for concrete façades reduce the water absorption of concrete, thus decreasing its electrolytic conductivity, which in turn reduces or stops the corrosion process. Organic silicon compounds (silanes, siloxanes), applied to saturation onto the concrete surface, are most often used to this end. This kind of water repellents are not film-forming and do not alter the concrete's aspect.

Appropriate film-forming coatings do not only reduce the absorption of water, but can also prevent carbonation of the concrete. Acrylic dispersions, which have to be applied in a continuous and sufficiently thick and pore-free coat, are frequently used for this purpose. When using crack-bridging façade coatings, the necessary dry film thickness leads to a considerable loss of the concrete's original texture. Good water-vapour diffusion capacity is vital for all kinds of coatings.

Corrosion inhibitors for the protection of existing concrete structures are available since recently only. Inhibitors penetrate through the concrete and fix themselves onto the steel surface. The protective film formed in this way reduces access of oxygen to the surface of the steel and slows down the speed of the corrosion process.

Corrosion inhibitors do not alter the concrete's aspect, cannot be affected by any mechanical action on the concrete's surface and have an excellent price/performance ratio.

### 1. Einleitung

Bewitterte Stahlbetonkonstruktionen werden in ihrer Gebrauchstauglichkeit durch unterschiedliche Schäden beeinträchtigt, z.B. durch:

- Schädigungen und ästhetische Beeinträchtigungen der Betonoberfläche, z.B. infolge Abwitterungen, Frostschäden, Absanden, Moosbewuchs etc.
- Korrosion der Bewehrung und ihre Folgeschäden wie Abplatzungen und reduzierte Tragfähigkeit.

Schädigungen der Betonoberfläche können vielfach allein durch eine Oberflächen-Schutzmassnahme vermieden werden. Zur Anwendung gelangen Hydro-

phobierungen und starre Schutzanstriche bzw. -lasuren. Rissüberbrückende Schutzbeschichtungen werden für diese Anwendungsarten sehr selten eingesetzt, da diese die Optik der Betonoberfläche drastisch verändern.

Bei Instandsetzungsarbeiten aufgrund von Korrosionsschäden werden rissüberbrückende Anstriche häufiger eingesetzt, deren Akzeptanz wird durch die dabei im Vordergrund stehende Schutzwirkung vergrössert.

Korrosionsschäden können mit Oberflächenschutzmassnahmen vorbeugend verhindert werden, zu deren Behebung sind jedoch weitere Massnahmen erforderlich. Die Instandsetzung zielt darauf

ab, eine oder beide der untenstehenden Korrosionsbedingungen zu unterbinden:

### Wiederherstellen der Wirksamkeit der Passivschicht auf der Stahloberfläche:

Die Passivschicht kann durch verschiedene Verfahren wiederhergestellt werden, z.B. durch Repassivieren mittels Auftrag einer zementösen Mörtel- oder Betonschicht (flächenhaft oder örtlich), elektrochemische Realkalisierung u.a.

Anschliessend wird ein Oberflächenschutz als vorbeugende Massnahme appliziert.

### Reduktion der Leitfähigkeit des Betons:

Die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons kann durch Absenken des Wassergehaltes verringert werden, was den Korrosionsstrom verkleinert und die Korrosion bremst. Vorgängig müssen Betonschichten mit ungenügender Festigkeit entfernt und freigelegte Bewehrung entrostet und reprofiliert werden. Eine Hydrophobierung und auch Schutzanstriche halten die Umgebungsfeuchtigkeit vom Beton fern, gewähren jedoch die Verdunstung von Feuchtigkeit aus dem Bauteilinneren.

Der Einsatz von Korrosionsinhibitoren ist verhältnismässig neu. Korrosionsinhibitoren beeinflussen den Korrosionsvorgang durch Bildung eines Schutzfilmes auf der Bewehrung.

## 2. Hydrophobierungsmittel

### 2.1. Wirkung/Wirkstoffgruppierung

Die Wirkung von siliciumorganischen Hydrophobierungsmitteln beruht auf deren Reaktion mit dem mineralischen Untergrund.

Die Betonoberfläche sowie die innere Oberfläche der Kapillaren werden aufgrund der hydrophoben Alkylgruppen der siliciumorganischen Verbindungen wasserabweisend.

Hydrophobiermittel sollen in den Untergrund eindringen und keinen Film bilden. Daher wird die Durchlässigkeit für Wasserdampf nicht messbar verändert. Das

\*Korrespondenz: M. Dietrich  
 Chemiker HTL  
 Sika AG  
 Tüffenwies 16–22  
 Postfach  
 CH–8048 Zürich  
 Tel.: +41 1 436 40 40  
 Fax: +41 1 436 46 55

bedeutet aber gleichzeitig auch, dass Hydrophobierungen keine Reduktion der Kohlendioxid-Durchlässigkeit erzeugen, also **keinen** Karbonatisierungswiderstand ergeben. Durch die Austrocknung des Untergrundes wird dessen Durchlässigkeit für Kohlendioxid sogar eher erhöht!

Leider sind unter dem Begriff 'lösemittelfreie Hydrophobierungsmittel und Imprägnierungen' die verschiedensten Materialien, mit zum Teil beträchtlichen Nachteilen, aufgetaucht:

- Wässrige Alkalisilikonate sind sehr stark ätzend und hinterlassen auf Beton einen weissen Salzbelag.
- Silikonölemulsionen können aufgrund ihrer grossen Emulsionstropfen nicht in den Untergrund eindringen und verändern den Oberflächenaspekt.
- Wachssäureester, Fettsäureester, div. Kunststoffemulsionen und sog. 'Biopolymere' sollten nicht als Hydrophobiermittel benannt werden. Sie sind meist filmbildend, verändern die Wasserdampfdurchlässigkeit, besitzen eine schlechte Witterungsbeständigkeit, sind teilweise umständlich in der Verarbeitung und häufig schlecht überarbeitbar.

Hingegen haben sich zur Hydrophobierung von Betonbauwerken Wirkstoffe aus der Gruppe der siliciumorganischen Stoffe bewährt: Diese werden in verschiedenen Formen – Lösung, Mikroemulsion, unverdünnt – angeboten. Die Wirkstoffe selbst lassen sich in drei Klassen einteilen:

#### 2.1.1. Silane

Die Alkylalkoxysilane werden als kleine Einzelmoleküle (Durchmesser *ca.* 0,5–10 nm) in Form des reinen Wirkstoffes oder in hochkonzentrierten Lösungen verarbeitet. Dank deren geringen Abmessungen sind die Silane in der Lage, sehr tief in den Untergrund einzudringen. Nach der Applikation reagieren die Silane (bei Anwesenheit von Feuchtigkeit) zu längerketten Molekülgruppen, welche den hydrophoben Effekt ergeben.

Dank des hohen Eindringvermögens und der konzentrierten Applikationsform schneiden die Silane in vielen Laboruntersuchungen mit hervorragenden Ergebnissen ab (Eindringtiefen bis zu 5 mm). Die Silane sind jedoch sehr flüchtig, wodurch in der Praxis ein hoher Wirkstoffverlust während und kurz nach der Applikation eintreten kann. Je langsamer die Reaktion und je 'günstiger' die Verdunstungsbedingungen, desto grösser der Verlust. Zudem können bei einem bald nach der Applikation auftretenden Schlagregen Auswaschungen nicht ausgeschlossen werden.

#### 2.1.2. Silikonharze

Silikonharze bestehen aus mehrheitlich bereits ausreagierten Molekülketten. Diese sind um ein Vielfaches grösser (1000–100000 nm) als bei Silanen und können daher vergleichsweise wenig in den Untergrund eindringen.

Silikonharze werden in Form von Lösungen, teilweise auch als Emulsionen, appliziert. Wegen ihres beschränkten Eindringvermögens besitzen sie keine Tiefenwirkung und werden auch eher durch Verwitterung abgebaut. Im weiteren ist an ihnen nachteilig, dass sie die Betonoberfläche häufig negativ verändern (Verdunkeln, Flecken, Glanz). Ihr Vorteil besteht in dem rasch feststellbaren Abperleffekt und der geringen Verdunstungsrate.

#### 2.1.3. Siloxane

Die Gruppe der Siloxane steht im Vergleich der Molekülgrösse zwischen den Silanen und den Silikonharzen. Die Länge der Siloxanmolekülketten liegt bei 80–1000 nm.

Mit der Gruppe der Siloxane wurde ein Optimum zwischen hoher Eindringtiefe und geringer Verdunstungsrate gefunden.

Siloxane werden in Form von Lösungen und als Mikroemulsionen angeboten, wobei die Mikroemulsionen ökologisch besonders sinnvoll sind. Die Tröpfchengrösse der Mikroemulsionen wurde durch Verwendung von speziellen Koemulgatoren (welche ebenfalls weiterreagieren und danach ihrerseits als Hydrophobierungswirkstoff dienen) derart verkleinert, dass sie in den Untergrund eindringen können. Weil die Siloxanmoleküle erst nach der Applikation miteinander reagieren sollen und diese Reaktion unter Anwesenheit von Feuchtigkeit stattfindet, können die Siloxan-Mikroemulsionskonzentrate erst auf der Baustelle mit Wasser verdünnt werden.

#### 2.2. Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient kennzeichnet die durch kapillare oder absorbtive Kräfte bedingte, flächenbezogene Wasseraufnahme von Baustoffen bei Oberflächenbenetzung ohne nennenswerten Überdruck. Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt mittels aufgeklebten Karstenröhrchen oder an Betonkernen welche an den Seitenflächen abgedichtet und mit der zu prüfenden Fläche auf ein unter Wasser stehendes Gitter gelegt werden.

Die flächenbezogene Wasseraufnahme steht meist in einer linearen Abhängigkeit zu der Quadratwurzel der Zeit. Der Wasseraufnahmekoeffizient wird für die Prüfung der Hydrophobierung zumeist

nach 1 und 3 h bestimmt (Einheit:  $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$ ). Der zu erzielende Wert ist abhängig von der Wasseraufnahme des unbehandelten Untergrundes. Mit Hydrophobierungsmitteln kann zumeist eine Reduktion um *ca.* das 15fache erzielt werden.

#### 2.3. Anwendungsgebiete

Die Wirkung von Hydrophobierungsmitteln ist begrenzt auf vertikale Flächen. Hydrophobierungen ergeben keinen dauerhaften Schutz gegen drückendes oder stehendes Wasser, da die Abstossungskräfte dazu zu klein sind.

Nebst dem Schutz gegen das Eindringen von Regenwasser können Hydrophobierungen das Eindringen von wasserlöslichen Schadstoffen (Tausalz!) vermindern. Anwendung: Stützmauern, Tunnelwände usw., die durch Tausalz-Einwirkung gefährdet sind. Im Fassadenbereich reduzieren Hydrophobierungsmittel die Wasseraufnahme, somit die Leitfähigkeit des Betons, was die Korrosionsgeschwindigkeit herabsetzen kann. Zudem reduzieren sich Verwitterungs- und Frostschäden, Verschmutzungen und Bewuchs durch Moos *etc.*

Interessant ist die Anwendung einer Hydrophobierung als 'Grundierung' unterhalb eines Anstriches. Durch das Eindringen des Hydrophobierungsmittels in den Untergrund ist im Falle einer Haarrissbildung die Risswand hydrophob, das Eindringen des Wassers über den Riss, oder eine andere Schwachstelle, wird reduziert. Dadurch findet keine Unterwanderung des Anstrichfilms statt, und die Gefahr von Ablösungen im Rissbereich ist reduziert.

#### 2.4. Applikation

Die Applikation von Hydrophobierungsmitteln erfolgt flutend, verwendet werden Roller, Pinsel und drucklose Spritzgeräte. Im Normalfall erfolgen 2–3 Applikationen, nass in nass.

Der Untergrund sollte möglichst trocken sein, um das Produkt gut aufsaugen zu können. Das Betonalter sollte nicht unter 4 Wochen (im Minimum 2 Wochen) liegen, einerseits um die Hydrophobierungsmittel nicht übermässig durch Alkalien zu belasten, aber auch um den Beton nicht frühzeitig auszutrocknen und die Hydratation zu stoppen. Hydrophobierter Beton karbonatisiert schneller als unbehandelter Beton. Die Hydrophobierungswirkung muss, um Korrosionsschäden zu vermeiden, deshalb frühzeitig kontrolliert und allenfalls erneuert werden.

Siloxan-Mikroemulsionen reagieren empfindlicher auf Feuchtigkeitsunter-

schiede im Untergrund. An örtlich feuchteren Stellen wird weniger Produkt aufgesaugt, welches an der Oberfläche liegenbleibt und zu Flecken führen kann. Deshalb ist nach dem Fluten auf ein gleichmässiges Verteilen und allenfalls Abwischen von überschüssigem Material zu achten.

### 3. Starre Schutzanstriche

#### 3.1. Typen, Anforderungen

Zum Schutz von bewitterten Stahlbeteonteilen (Fassade im weitesten Sinne) werden als Basis für starre Anstriche fast nur noch Acrylharze in gelöster oder dispergierter Form verwendet. Diese Materialien weisen die folgenden wichtigen Eigenschaften auf:

- alkalibeständig (kein Verseifen)
- witterungsbeständig
- einkomponentig
- sozusagen unbeschränkte Farbtonvielfalt
- geringe Wasseraufnahme
- hohe Wasserdampfdurchlässigkeit
- hoher Kohlendioxid-Diffusionswiderstand
- gute Haftung zu zementösen Untergründen.

Die starren Anstriche werden in zwei Typen unterteilt:

#### A) Deckend

Nebst dem Bindemittel, Lösemittel/Wasser und verschiedenen Hilfsstoffen enthalten deckende Typen hohe Anteile an Füllstoffen und Pigmenten. Sie werden in 2-3 Arbeitsgängen appliziert. Die mittlere Trockenfilmschichtstärke liegt in der Grössenordnung von 0,1 mm.

#### B) Lasierend

Diese Arten enthalten beinahe keine Füllstoffe und Pigmente, teilweise ist auch der Bindemittelgehalt reduziert. Lasierende Anstriche werden meist nur in 1-2 Arbeitsgängen appliziert. Dadurch wird der Untergrundaspekt nur geringfügig verändert, allerdings können auf diese Weise z.B. Reparaturstellen nicht überdeckt, sondern nur leicht angepasst werden. Die mittleren Trockenfilmschichtstärken liegen im Bereich von 0,05 mm. Die Schutzwirkung ist, nicht zuletzt auch wegen häufigeren Fehlstellen, im Vergleich zu deckenden Anstrichen geringer. Um die Schutzwirkung zu steigern, sollte vorgängig eine Hydrophobierung appliziert werden

#### 3.2. Karbonatisierungsbremse

Neben der Reduktion der Wasseraufnahme und damit einer Begrenzung des Wassergehaltes im Beton, dem Fernhal-

ten von Chloriden und sonstigen gelösten Schadstoffen sollen Schutzanstriche für Beton auch den Karbonatisierungsprozess verlangsamen bzw. stoppen.

Wie bei der Wasserdampfdiffusion kann die Dichtigkeit eines Anstrichfilmes gegenüber Kohlendioxid unter Einbezug der Schichtstärke als CO<sub>2</sub>-diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (Sd-CO<sub>2</sub>) angegeben werden. Diese wird durch Multiplikation der CO<sub>2</sub>-Diffusionswiderstandszahl mit der Schichtstärke S gebildet.

Aufgrund der Diffusionsgesetze konnte bestimmt werden, dass die Karbonatisierung von Beton hinsichtlich des Korrosionsschutzes der Bewehrung in ausreichendem Masse verzögert wird, wenn der Diffusionswiderstand der Beschichtung einer CO<sub>2</sub>-diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von 50 m entspricht.

Eine willkürliche Erhöhung dieses anerkannten und verbreiteten Richtwertes erzeugt keine zusätzliche Sicherheit, sofern nicht andere, praxisrelevantere Massnahmen miteinbezogen bzw. vorangestellt werden.

Auch führt die Berechnung der erforderlichen Schichtstärke zur Erreichung einer ausreichenden Karbonatisierungsbremse häufig zu falschen Schlussfolgerungen. Unter Bezug auf Materialien mit sehr hohen Diffusionswiderstandszahlen können sehr geringe Schichtstärken errechnet werden, die aber in der Praxis den gewünschten Effekt nicht zeigen, denn:

- Mit baustellenüblichen Verarbeitungsgeräten können selbst auf planem Untergründen keine absolut gleichmässigen Schichtstärken von Anstrichen erzielt werden.
- Beton und Reparaturmörtel weisen eine grobe, inhomogene und poröse Struktur auf. Diese Umstände müssen berücksichtigt werden, insbesondere muss eine genügend grosse Kornüberdeckung vorhanden sein.
- Die natürliche Verwitterung führt zu einem Abbau der Schichtstärke.

#### 3.3. Applikation, Untergrund

Die Applikation der Schutzanstriche erfolgt mit Pinsel, Roller oder Spritzgeräten. Um eine möglichst gleichmässige, fehlerstellenfreie Schichtstärke zu erzielen, werden mindestens 2, besser 3 Arbeitsgänge mit entsprechenden Zwischenwartezeiten empfohlen. Besondere Sorgfalt in bezug auf eine gleichmässige Schichtstärke erfordern Lasuren.

Um eine optimale Haftung erzielen zu können, müssen Verunreinigungen, Russ, Rückstände von Trennmitteln (Schalöl), Staub, Ausblühungen, schlechthaftende

Altanstriche und alle weiteren Fremdbestandteile entfernt werden.

Damit ein durchgehender, *geschlossener Anstrichfilm* entsteht, müssen Lunken und Poren vorgängig verschlossen werden. Optimal ist beispielsweise die Verwendung eines kunststoffvergüteten Flächenspachtels. Dies wiederum bedingt das Abtragen der Zementhaut, beispielsweise mittels Höchstdruck-Wasserstrahl, wodurch gleichzeitig eine Rauigkeit geschaffen wird, welche eine gute Verzahnung gewährt.

#### Unterschiede Dispersionen/Lösungen in der Applikation:

- Verarbeiter geben den Dispersionsanstrichen eindeutig den Vorzug, da keine Geruchsbelästigungen auftreten, weniger Schutzmassnahmen erforderlich sind, die Arbeit nicht durch schnelles Anziehen und Trocknen erschwert ist, die Geräte mit Wasser gereinigt werden können usw.
- Ein Vorteil der lösemittelhaltigen Produkte ist deren geringere Witterungsempfindlichkeit während der Applikation und Trocknung:
  - Frühere Regenfestigkeit
  - Geringere Beeinflussung durch Nachtfrost (während der Trocknung)
  - Raschere Trocknung bei tiefen Temperaturen und/oder hoher Luftfeuchtigkeit.
- Da Dispersionen während der Verarbeitung mindestens 8° Umgebung- und Untergrundtemperatur zur Wasserverdunstung bzw. Filmbildung benötigen, haben lösemittelhaltige Produkte eine Berechtigung für Arbeiten in der Übergangszeit.
- Während mit gelösten Acrylharzen auch auf sehr planem, dichten oder auch auf sehr stark saugenden Untergründen noch befriedigende Haftungen erreicht werden können, sind die Bedingungen für wässrige Systeme strenger. Auf kritischen Untergründen (z.B. extrem glatt, tiefe Oberflächenfestigkeit, aussandend, extrem saugfähig), welche nicht durch Reinigung oder Oberflächenabtrag verändert werden können, empfiehlt sich unter Umständen eine vorgängige Grundierung oder ein erster Anstrich mit einem lösemittelhaltigen Produkt.
- Auf zementösen, acrylharzvergüteten Flächenspachteln eignen sich wässrige Anstriche und Grundierungen besser als lösemittelhaltige Produkte. Voraussetzung ist allerdings, dass die Oberfläche des Spachtels nicht übermässig abgerieben wurde. Bei der Verwen-

dung von lösemittelhaltigen Grundierungen müssen die Zwischenwartezeiten verlängert werden. Da die Lösemittel vom Kunststoff aufgenommen und zurückgehalten werden können, kann eine zu früh aufgebrachte Deckbeschichtung vom verbliebenen Lösemittel beeinträchtigt werden.

#### 4. Rissüberbrückende Schutzanstriche

##### 4.1. Anforderungen, Rissüberbrückungsklassen

- Für rissüberbrückende Schutzanstriche sind die gleichen Anforderungen wie für starre Schutzanstriche vorausgesetzt, d.h.:
- geringe Wasser- und damit Chloridaufnahme ( $W \leq 0,05 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ )
  - gute Wasserdampfdiffusionsfähigkeit ( $Sd\text{-H}_2\text{O} \leq 4 \text{ m}$ )
  - hoher  $\text{CO}_2$ -Diffusionswiderstand ( $Sd\text{-CO}_2 \geq 50 \text{ m}$ )
  - alkali- und witterungsbeständig
  - gute Haftung.

##### 4.2. Betrachtungen zur Rissüberbrückung

Bei der Betrachtung der Vorgänge beim Öffnen eines Risses muss zwischen vorhandenen, sich bewegenden Rissen und nachträglich entstehenden Rissen unterschieden werden.

Da bei nachträglich entstehenden Rissen noch keine Rissbreite für die Bewegung zur Verfügung steht, sind die auftretenden Zugspannungen im Beschichtungsfilm (und die daraus resultierenden Schubspannungen im Verbund mit dem Untergrund) in diesem Fall besonders gefährlich, da grössere Spannungsspitzen auftreten.

Damit es nicht zu einem Anriss in der Beschichtung kommt, darf die Verbundfestigkeit zum Untergrund nicht zu gross sein. Dann löst sich die Beschichtung in der Umgebung des Risses vom Untergrund ab, so dass eine Dehnlänge entsteht, über die sich die Rissöffnungsbreite verteilen kann. Die Verbundfestigkeit darf jedoch nicht zu gering werden, da sich sonst durch die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Risse die Beschichtung ablöst.

Optimale Materialien weisen zudem auch bei tiefen Temperaturen weichelastische Eigenschaften auf, damit bei Rissbildung und Risserweiterung nur geringe Spannungen entstehen, die sich durch plastische Anteile abbauen können.

Durch die Materialverjüngung im Rissbereich sowie auch durch allfälliges 'Nachfliessen' des Materials zeichnet sich der Riss optisch von der Umgebung ab. Von

hoher Bedeutung für rissüberbrückende Anstriche ist auch deren Witterungsbeständigkeit. Allfällige Weichmacher dürfen nicht durch Wärme oder UV aus dem Material diffundieren, auch das Bindemittel selbst darf nicht verspröden.

##### 4.3. Ästhetik von rissüberbrückenden Dispersionen

Beim Oberflächenschutz mit rissüberbrückenden Dispersionen ist mit einer Veränderung des Oberflächenaspekts zu rechnen. Aufgrund der notwendigen Schichtstärken (mind. 0,3 mm) werden Untergrundunebenheiten egalisiert, und die Oberflächenstruktur von Beton geht teilweise verloren. Daher und z.T. auch wegen ihrer Filmeigenschaften wirken diese Anstriche leicht 'speckig'.

Aufgrund ihrer elastoplastischen Eigenschaften können Verschmutzungen (Staub, Russ) in die Beschichtung eindringen bzw. auf dieser haften. Diese Erscheinung zeichnet sich vor allem bei Bauteilen ab, an denen sich der Schmutz auf einem horizontalen Bereich ansammelt und sich bei wenig Wasserzutritt über die vertikale Fläche streifenförmig verteilt, z.B. bei Balkonbrüstungen ohne Abdeckung.

Das Überstreichen mit starren Produkten ist üblicherweise nicht zu empfehlen. Es können dabei durch innere Spannung Oberflächenrisse und Ablösungen entstehen.

Besseres Verhalten zeigen Acryldispersionen, welche durch Lichteinwirkung (UV) an der äussersten Oberfläche (ca. 20 nm tief) nachvernetzen und dadurch weniger schmutzanfällig sind, ohne dass innere Spannungen und Risse auftreten.

##### 4.4. Applikation

Bei der Verarbeitung der rissüberbrückenden Dispersionsanstriche sind zunächst die gleichen Punkte zu beachten wie bereits im Kap. 3.3 behandelt. Rissüberbrückende Dispersionen benötigen eine Grundierung als Haftbrücke. Es kann zwischen wasserverdünnbaren und lösemittelhaltigen Grundierungen gewählt werden, wobei dieselben Kriterien zu beachten sind wie bei den starren Anstrichen. Bei der Verwendung von lösemittelhaltigen Produkten ist besonders auf genügende Zwischentrocknung zu achten.

Von grösster Wichtigkeit ist das Einhalten der vorgeschriebenen Filmschichtstärke, die in erster Linie über den Verbrauch kontrolliert werden sollte. Die Rissüberbrückungsfähigkeit hängt entscheidend davon ab!

Um die benötigte Verformbarkeit zu erhalten, sind die Dispersionen verhältnismässig tief pigmentiert. Insbesondere

bei reinen Bunttönen kann eine schlechte Deckkraft beobachtet werden. Bei den ohnehin notwendig hohen Schichtstärken spielt dies jedoch normalerweise keine Rolle.

#### 5. Inhibitoren

Korrosionsinhibitoren können nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden:

##### Nach Einsatzart:

- Als vorbeugender Schutz **im Frischbeton**, zugegeben als Betonzusatzmittel
- Als Imprägnierung **auf Altbeton**, präventiv oder als begleitende Instandsetzungsmassnahme auf die Betonoberfläche aufgetragen.

##### Nach Funktionsweise:

- Adsorptionsinhibitoren, die sich als Film auf der Eisenoberfläche ablagern infolge physikalischer und chemischer Bindungskräfte
- Passivatoren, die an der Eisenoberfläche zu einem Passivfilm umgesetzt werden
- passivitätsfördernde Inhibitoren.

##### Nach Wirkungsweise:

- kathodisch wirksame Inhibitoren
- anodisch wirksame Inhibitoren
- dual wirksame Inhibitoren.

##### Nach chemischer Zusammensetzung:

- organische Inhibitoren wie Amine, Alkohole, Carbonsäuren etc.
- anorganische Inhibitoren wie Chromate, Nitrit, Phosphat etc.

##### 5.1. Eigenschaften und Vorteile der Inhibitoren im Vergleich zu herkömmlichen Instandsetzungsmassnahmen

Inhibitoren für den Schutz von Altbeton werden als wässrige Lösung auf den Beton aufgetragen. Die Inhibitorlösung ist farblos und klar.

- Da ausschliesslich die Armierung geschützt wird, bleibt das Aussehen des Bauwerks unverändert. Dies ist von grossem Nutzen zur Erhaltung von schützenswerten Bauten aus Sichtbeton.
- Weil die intakte Betonsubstanz belasten werden kann, entstehen weder Kosten für dessen Abtrag noch für das Wiederherstellen des alkalischen Milieus durch Mörtel- oder Betonauftrag.
- Der vorbeugende Schutz von Betonbauten mit Korrosionsinhibitoren verursacht eine sehr geringe Beeinträchtigung der Objektnutzung während der

Bauzeit. Es entstehen kaum Schmutz- und Staubeentwicklung, Lärmbelastigungen oder lange Sperrfristen.

- Die Schutzmassnahme wirkt im Betoninnern; sie kann daher durch mechanische Beschädigungen wie beispielsweise durch Schneepflüge oder Schrammen von Fahrzeugen nicht verletzt werden.
- Die Instandhaltung und -setzung von Stahlbetonbauten mit Inhibitoren weist ein hervorragendes Preis-/Leistungsverhältnis auf.
- Die Wirkung von Korrosionsinhibitoren kann mit anderen Schutzmassnahmen (v.a. Prinzip W; Reduktion des Wassergehaltes) kombiniert werden.
- Inhibitoren führen nicht zu einer Veränderung der Dampfdiffusionsfähigkeit des Betons.
- Der präventive Schutz mit Inhibitoren ist ökologisch sehr sinnvoll. Dadurch kann die Entsorgung von Altbeton vermieden werden, ebenso die aufwendige Herstellung von Betonersatz. Lärm- und staubintensive Arbeiten werden vermieden.
- Inhibitoren wirken sowohl im karbonatisierten Beton wie bei chloridverursachter Korrosion. **Chloride können von der Stahloberfläche verdrängt werden.**

### 5.2. Wirkung der Adsorptionsinhibitoren

Adsorptionsinhibitoren werden auf die saugfähige Betonoberfläche aufgetragen und gelangen über mehrere Transportmechanismen auf die Stahloberfläche, wo sie aufgrund von Adhäsionskräften einen Schutzfilm bilden. Der Schutzfilm besitzt eine Schichtdicke im Bereich von ca.  $10^{-6}$  mm.

Der entstandene Schutzfilm verzögert den Korrosionsbeginn und reduziert die Korrosionsgeschwindigkeit indem der Zutritt von Sauerstoff sowie die Auflösung des Eisens reduziert wird.

**Die Betoneigenschaften werden nicht verändert, es findet keine Realkalisierung statt, Chloride werden von der Stahloberfläche entfernt, aber dem Beton nicht entzogen.**

Es liegt auf der Hand, dass Korrosionsinhibitoren, welche auf die (Alt-)Betonoberfläche aufgetragen werden, den Beton durchdringen müssen, um überhaupt auf die Stahloberfläche zu gelangen. In vielen Fällen ist es nicht ausreichend, wenn die Inhibitoren nur bis zur Armierung vordringen. Zur Sicherheit gegen die Bildung von Makroelementen muss die Inhibitor Eindringtiefe mindestens gleich gross sein wie die Karbonatisierungstiefe oder die

Tiefe der Chloridfront bzw. diese um den Durchmesser der Armierung übertreffen. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass bei sehr dichtem Beton und hoher Überdeckung im Normalfall die Armierung durch die Passivierung im intakten Beton geschützt ist.

Während anorganische Inhibitoren ausschliesslich durch kapillares Saugen aufgenommen bzw. transportiert werden können, findet bei organischen Produkten auch ein Transport in der Gasphase statt, wodurch hohe Eindringtiefen und -geschwindigkeiten ermöglicht werden.

Andererseits besitzt der organische Inhibitor selbstverständlich das Bestreben, wiederum aus dem Beton 'abdunsten'. Diesem Bestreben wird allerdings durch die hohe Stahlaffinität entgegengewirkt. Das sogenannte 'Inhibitordepot' im Beton wird bei organischen Inhibitoren im Verlaufe der Jahre sicherlich reduziert, zumindest an der Betonoberfläche. Dem kann einerseits mittels Oberflächenbeschichtungen entgegengewirkt werden, andererseits ist es angebracht, den Inhibitorgehalt zu überwachen und ähnlich wie bei Hydrophobierungsmitteln bei Bedarf zu erneuern.

Inhibitoren können die folgenden Wirkungsweisen zeigen:

1. An der **Anode** wird durch den Schutzfilm die Eisenauflösung stark gehemmt, und/oder
2. an der **Kathode** erschwert die Inhibitorschicht den Zutritt von Sauerstoff zur Stahloberfläche.

Inhibitoren mit sowohl kathodischer wie auch anodischer Wirkungsweise sind zu bevorzugen, da sie die Gefahr der Bildung von Makroelementen reduzieren [1].

Die Inhibitorwirksamkeit ist folgendermassen definiert:

$$W = \frac{(ik)0 - (ik)I}{(ik)0} \times 100\%$$

wobei:

(ik)0 = Korrosionsstrom ohne Inhibitor

(ik)I = Korrosionsstrom mit Inhibitor

Nebst der Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit führen Korrosionsinhibitoren auch zu einer Verzögerung des Korrosionsbeginns. Dies ist ein weiterer Grund dafür, Inhibitoren möglichst frühzeitig einzusetzen! Insbesondere bei schützenswerten Sichtbetonfassaden kann bei präventivem Inhibitorinsatz die Anzahl und das Ausmass der Reparaturstellen – welche auch bei grosser Sorgfalt nicht

vollständig unsichtbar ausgeführt werden können – eingeschränkt werden.

Selbstverständlich können mittels Korrosionsinhibitoren keine Betonschäden rückgängig gemacht werden. Aber auch wenn das Bauwerk bereits beginnende Korrosionsschäden aufweist und konventionell, also mittels lokalem oder vollflächigem Reprofilieren und einer Beschichtung instandgesetzt wird, sprechen viele Gründe für den Gebrauch von Korrosionsinhibitoren:

- Der Anteil der abzutragenden Betonsubstanz kann entscheidend reduziert werden, dadurch ist eine **Kosteneinsparung** möglich.
- Die **Dauerhaftigkeit** der Instandsetzung bzw. die **Nutzungsdauer** des Bauwerks wird erhöht.
- Das Bauwerk wird besser geschützt weil die Armierung auch bei allfälligen Mängeln, die in der Praxis nicht ausgeschlossen werden dürfen, durch die **vollflächige** Behandlung vor Korrosion geschützt wird.
- Durch die vollflächige Anwendung wird die Bildung von Korrosionselementen, z.B. im Bereich von lokalen Reparaturstellen, verhindert.

### 5.3. Verarbeitung

Die Verarbeitung von organischen Inhibitoren ist einfach und rationell: Zum Auftragen der benötigten Menge sind in der Regel nur 3–5 Arbeitsgänge notwendig. Der Inhibitor wird möglichst flutend aufgetragen, mittels Pinsel, Roller oder Niederdruck-Spritzgeräte. Die üblichen Personenschutzmassnahmen (Schutzbrille, Handschuhe) sind ausreichend, einzig bei der Spritzapplikation müssen Masken wegen des Sprühnebels getragen werden. Aufgrund ihres hervorragenden Penetrationsverhaltens dringen organische Inhibitoren ohne besondere Zusatzmassnahmen in den Beton ein. Nur wenn zusätzlich Beschichtungen oder Hydrophobierungen aufgebracht werden, soll vorgängig gewässert werden, um den Initialtransport des Inhibitors zu erhöhen. Anorganische Inhibitoren werden in mehreren Arbeitsgängen aufgetragen, wobei dazwischen stets ein Wässern durchgeführt wird. Die Sichtbetonoberfläche von ästhetisch anspruchsvollen Bauwerken muss nach der Applikation nochmals mittels Hochdruckreiniger gesäubert werden, ebenso vor dem Auftragen von weiteren Instandsetzungssystemen (zu beachten: Verträglichkeit). Bauteile aus anderen Werkstoffen als Beton, speziell verzinktes Eisen und Kupfer, sind vor dem Kontakt mit Inhibitoren zu schützen (Abdecken).

#### 5.4. Erfolgsnachweis

Der eigentliche Erfolgsnachweis einer Inhibitoranwendung gestaltet sich am Bauwerk schwieriger als im Labor oder an praxisgerechten Prüfkörpern. Dies ist allerdings keine Problematik, die durch die Inhibitoren verursacht wird, vielmehr sind es Probleme messtechnischer Natur. Es stehen viele Messmethoden und -geräte zur Verfügung, um den Korrosionszustand von Stahlbetonbauwerken aufzuzeichnen und zu überwachen. Zumeist handelt es sich um verhältnismässig neue Technologien, welche sich in der Praxis zuerst bewähren müssen. Daneben müssen die Messergebnisse von einem Fachmann erst noch richtig interpretiert werden können!

Zu berücksichtigen ist auch, dass der Einsatz von Inhibitoren möglichst **präventiv** stattfinden soll. Daher sind die Korrosionsströme vor der Applikation des Inhibitors zumeist noch klein und deshalb kann der Erfolgsnachweis nur langfristig und im Vergleich zu einem unbehandelten Bauteil erfolgen.

**Die Potential(feld)messung** hat mittlerweile breite Verwendung und Akzeptanz gefunden. Die Methode ist v.a. zur raschen, zerstörungsfreien, grossflächigen Zustandsaufnahme geeignet. Die Potentialmessung gibt ausschliesslich Auskunft über die **Wahrscheinlichkeit** der Korrosion, aber nicht über die **Korrosionsgeschwindigkeit**. Die Messergebnisse müssen zur Interpretation mit einer visuellen Beurteilung des Korrosionszustandes der Armierung (Sondierfenster) verbunden werden. Als Einflussgrössen müssen berücksichtigt werden:

- Temperatur
- Feuchtigkeit, Zusammensetzung der Porenlösung
- Korrosionsart (lokal, flächig)
- weitere.

Die Potentialmessung findet breite Anwendung zum Ermitteln der Lage und Ausdehnung von Korrosionsstellen, welche durch Chloridbelastung verursacht wurden. Bei Korrosion, welche durch Karbonatisierung ausgelöst wurde, ist die Potentialdifferenz kleiner, weshalb diese Methode im Hochbau weniger sinnvoll ist.

Als Erfolgsnachweis für die Instandsetzung mit Inhibitoren scheint die Potentialmessung nur beschränkt geeignet, insbesondere darf nicht damit gerechnet werden, dass eine drastische Veränderung der Potentiale unmittelbar nach dem Inhibitoreinsatz messbar wird. Zudem können durch die Veränderung der Betonleitfähigkeit (Veränderung der Zusammensetzung der Porenlösung) Fehler entstehen. Der Erfolgsnachweis mittels Potentialmes-

sung kann nur langfristig und **im Vergleich zu einem unbehandelten Bauteil** erfolgen.

**Die Messung der Korrosionsströme** bzw. der Korrosionsgeschwindigkeit ist beim Einsatz von Inhibitoren als Erfolgsnachweis aufschlussreicher, insbesondere in karbonatisiertem Beton. Auch zur Messung der Korrosionsgeschwindigkeit existieren mehrere Prinzipien und Messgeräte, welche grösstenteils noch wenig praxiserprobt sind, und auch diese Messungen unterliegen verschiedensten Störeinflüssen.

Mit dem kommerziell erhältlichen Gerät *GEOCISA6* können über den Polarisationswiderstand punktuelle, zerstörungsfreie Messungen der Korrosionsströme durchgeführt werden [2][3]. Nachteilig an diesem Messgerät ist, dass es nicht zur vollflächigen Zustandsaufnahme und Objektbeurteilung eingesetzt werden kann. Als Erfolgsnachweis für die Inhibitoranwendung empfiehlt sich auch hier, die Messwerte mit einer unbehandelten Fläche zu vergleichen. Diese Messungen können nicht kontinuierlich stattfinden, deshalb handelt es sich immer um Momentaufnahmen

Der Erfolgsnachweis des Einsatzes eines organischen Inhibitors, also die Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit, konnte durch Messungen mit dem *GEOCISA6*-Gerät bereits an Praxisbeispielen erbracht werden [4].

Eingegangen am 13. März 1998

[1] 'Concrete Bridge protection and rehabilitation: chemical and physical techniques', Strategic highway research program, SHRP-S-666, S. 90-91, Washington, DC, 1993.

[2] B. Elsener, 'Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton', SIA-Nr. 5, 1997.

[3] J. Rodriguez, L.M. Ortega, A.M. Garcia, 'On-site corrosion measurements in concrete structures', *Construction Repair*, Nov./Dec., 1995.

[4] J. Broomfield, 'The pros and cons of corrosion inhibitors', *Construction Repair*, July/Aug., 1997.