SGK®

Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich

Tel. +41 44 213 15 90
Fax +41 44 213 15 91
www.sgk.ch

Schweizerische Gesellschaft
für Korrosionsschutz

Société Suisse de Protection
contre la Corrosion

Swiss Society for
Corrosion Protection

Entwicklung eines Verfahrens zur Verhinderung von Korrosion an Stahlschalungen

Bericht Nr.:	07047
Auftraggeber:	Cemsuisse
Verfasst:	Dr. Markus Büchler
Geprüft:	Dr. Martin Brem
Datum:	15. Februar 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Das Wichtigste in Kürze 3
2. Projektvoraussetzungen und Ziele 3
3. Durchgeführte Arbeiten 4
   3.1. Untersuchung von Trennmitteln 4
   3.2. Entwicklung eines Schutzstromgeräts 4
   3.3. Laborversuch mit galvanischen Anoden 4
      3.3.1. Herstellung Probekörper 4
      3.3.2. Versuchsaufbau 5
      3.3.3. Versuchsablauf 5
   3.4. Feldversuch mit galvanischen Anoden 6
      3.4.1. Versuchsaufbau 6
      3.4.2. Versuchsablauf 6
   3.5. Einsatz des Schutzsystems in der Praxis 6
4. Resultate und Diskussion 7
   4.1. Trennmittel 7
      4.1.1. Elektrochemische Charakterisierung 7
      4.1.2. Auslagerungsversuche in Beton 7
   4.2. Entwicklung eines Schutzstromgeräts 8
   4.3. Laborversuch mit galvanischen Anoden 11
   4.4. Feldversuch galvanischen Anoden 12
   4.5. Einsatz des Schutzsystems in der Praxis 14
   4.6. Schlussfolgerungen 15
      4.6.1. Vergleich Feld- und Laborversuch 17
5. Bedeutung für die Praxis 17
6. Empfehlungen für die weitere Umsetzung 17
7. Finanzielles 18
8. Literatur 18

1. Das Wichtigste in Kürze

Das Phänomen von Korrosion an Stahlschalungen ist seit langem bekannt. In letzter Zeit sind aber vermehrt Probleme aufgetreten, welche sowohl in der Schweiz als auch im europäischen Umfeld zur Untersuchungen der möglichen Ursachen geführt haben. Bisher ist der Effekt nicht abschliessend erklärt und es sind auch keine konkreten Lösungsansätze vorhanden [1, 2]. Generell ist aber in den nächsten Jahren tendenziell mit einer Zunahme der Korrosionsproblematik zu rechnen, da beispielsweise der Chromatgehalt im Zement reduziert wird und der Anteil an Klinker generell abnimmt.

Im Rahmen des Projektes wurde ein elektrochemisches Schutzsystem entwickelt, welches die Verbesserung der Korrosionssituation unabhängig vom eingesetzten Zement und den angewendeten Trennmitteln ermöglichen soll. Dabei wurden verschiedene Varianten von Schutzkonzepten untersucht. Im Vordergrund stand die Möglichkeit der Verwendung der Bewehrung als Elektrode. Es zeigte sich aber klar, dass dies zu einer Korrosion der Bewehrung führen kann, welche die Dauerhaftigkeit des Bauteils gefährden könnte. Unter Berücksichtigung der Anwendbarkeit im Betrieb, der Investitionskosten und auch der Fehlertoleranz wurde eine Methode entwickelt, welche mit Hilfe von galvanischen Anoden den Schutz der Stahlschalungen ermöglichen soll.

Die Wirksamkeit wurde in Laborversuchen nachgewiesen. Weiter wurde in einem Feldversuch mit einem sensorbestückten Bauteil die Wirksamkeit und die Anforderungen an die Schutzmethode überprüft. In der Folge wurde ein mehrmonatiger Feldversuch durchgeführt. Dabei wurde der Vergleich zwischen einer Schalung mit Schutz und ohne Schutz vorgenommen. Diese Messung wurde bewusst im Herbst angesiedelt, da erfahrungsgemäss die Problematik der Korrosion der Stahlschalung in diesem Zeitraum besonders ausgeprägt ist. Leider wurde an keiner der beiden Schalungen Korrosion beobachtet. Der abschliessende Nachweis der Wirksamkeit konnte somit im Feldversuch nicht erbracht werden. Aufgrund der Untersuchung wird aber klar, dass die Schutzmethode keine negativen Auswirkungen auf die Betonoberfläche hat und dass deren Anwendung im Rahmen der Produktion zu keinen Problemen führt.

Die Parameter für die Anwendung der Messmethode wurden erarbeitet und können technisch sofort genutzt werden. Falls Probleme mit Korrosion an der Stahlschalung bei einzelnen Zementsorten oder in gewissen Zeiträumen auftreten, ist ein Verfahren verfügbar, welches zumindest eine Verbesserung der Situation bringen sollte.

2. Projektvoraussetzungen und Ziele

Die Korrosion an Stahlschalungen führt zu erheblichen Kosten bei der Produktion von Fertigelementen. Diese Effekte treten sporadisch auf, wobei sowohl die klimatischen Bedingungen, die Trennmittel aber auch der Beton einen Einfluss haben dürften. Da Korrosion einerseits die Stahlschalungen schädigt, die Korrosionsprodukte aber auch zu einer Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbilds der Bauteile führen können, liegt es im Interesse der Industrie dieses Problem minimieren zu können.

Aufgrund der von der SGK durchgeführten Untersuchungen zum Thema der Korrosion an Stahlschalungen, der jahrelangen Erfahrung mit elektrochemischen Schutzverfahren, sowie den neusten Ergebnissen aus der Sensortechnik ist ein Verfahren im Grundkonzept erarbeitet worden, welches das Ausmass der Korrosion der Stahlschalung während des Abbindeprozesses des Betons verringern soll.

Im Rahmen des Forschungsprojekts sollen verschiedene Varianten des Schutzkonzepts überprüft und deren Umsetzbarkeit in die praktische Anwendung evaluiert werden. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens, welches von den Fertigelementherstellern eingesetzt werden kann, sobald Korrosionsprobleme an den Schalungen auftreten.

3. Durchgeführte Arbeiten

3.1. Untersuchung von Trennmitteln

Es wurden 5 verschiedene Trennmittel untersucht. Für deren Charakterisierung wurden galvanostatische Stromdichte-Potenzialkurven von Stahlproben in Frischbeton durchgeführt. Die Stahlproben wurden mit Schleifpapier der Körnung p 320 geschliffen und anschliessend mit dem Trennmittel bepinselt. Die Betonrezeptur für den Mörtel mit Normo 4 ist in Tabelle 1 aufgeführt. Als Bezugselektrode wurde eine Kupfer/Kupfersulfatelektrode (CSE) verwendet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der verwendeten Mörtel

Bindemittel	Wasser [g]	Bindemittel [g]	Zuschlag 0-4 mm [g]	NaCl g
Normo 4	20	40	120	
CEM III/B	20	40	120	0.13178

Für die Charakterisierung der Korrosionsschutzwirkung wurden die Stahlprüfkörper in einem CEM III/B mit erhöhtem Chloridgehalt von 0.2 % bezogen auf den Zementgehalt eingebettet. Diese Zusammensetzung des Mörtels ist als aggressiv einzustufen, entspricht aber den Normvorgaben. Nach dem Abbinden wurden die Stahloberflächen visuell beurteilt.

3.2. Entwicklung eines Schutzstromgeräts

Für die Untersuchung des optimalen Schutzsystems wurden verschiedene Schutzkonfigurationen geprüft. Dabei wurden verschiedenste Parameterkonfigurationen hinsichtlich deren Schutzwirkung untersucht. Als Schutzstromgerät wurde ein Jaissle Potentiostat (PCT 1002) verwendet, welcher für die Untersuchungen als eine Gleichspannungsquelle eingesetzt wurde. Dabei wurde die Bewehrung als Anode und die Schalung als Kathode geschaltet. Zur Strombegrenzung wurden zusätzlich elektrische Widerstände in den Stromkreis eingebaut. Für die Messdatenerfassung wurde der Stromfluss in regelmässigen Abständen unterbrochen und das Potenzial von Bewehrung und Schalung erfasst. Als Bewehrung und Schalung wurden jeweils Messproben mit einer Fläche von 1 cm^2 verwendet.

3.3. Laborversuch mit galvanischen Anoden

3.3.1. Herstellung Probekörper

Bei den Schalungen handelt es sich um Stahlschalungen, wie in Fertigteilwerken üblich. Die Abmessungen (L x B x H) betragen 160 x 80 x 80 mm. Der verwendete Beton ist ein Fertigbeton (maxit ton 908) aus dem Baumarkt der Firma Maxit. Beim verwendeten Zement handelt es sich um Portlandzement CEM I, das Grösstkorn der Zuschläge ist 8 mm. Der

Wasserbedarf der fertigen Mischung beträgt pro Kilogramm Fertigbeton ca. 0.1 l. Man kann also von einem üblichen Standardbeton sprechen. Der Beton wurde auf dem Rütteltisch verdichtet.

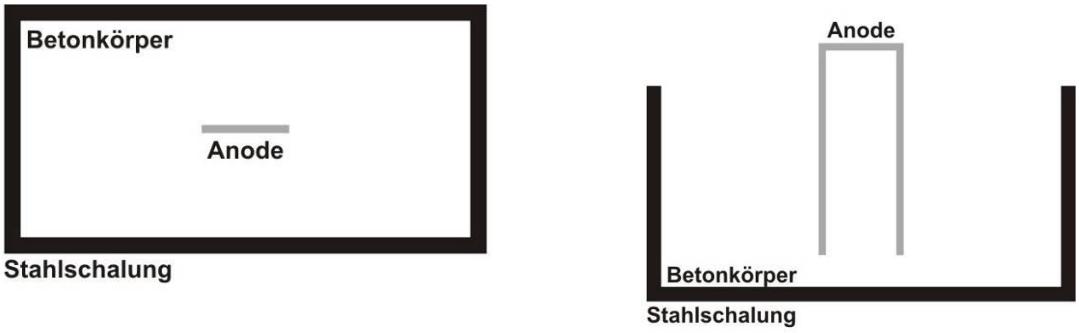


Abb. 1: Prinzipskizze Probekörper mit Π-förmigen Anoden. Links: Draufsicht. Rechts: Ansicht

Die Anode hat die Form eines umgekehrten U (Π). Eine Anode besteht aus Aluminium, die andere aus einem verzinkten Draht. Die Anoden sind 70 mm tief in den Probekörper eingesteckt. Der Durchmesser der Anodendrähte beträgt 20 mm. Die Anoden sind zentrisch in den Probekörpern angebracht, der Abstand zur Schalung beträgt 10 mm (Abb. 1).

3.3.2. Versuchsaufbau

Ein Probekörper mit Horizontalanode wurde an einen stromstärkegesteuerten Gleichrichter angeschlossen. Dabei wurde nur die Horizontalanode an den Gleichrichter angehängt. Die Stahlschalung ist die Kathode. Die vertikale Anode dient der Überprüfung der Eigenkorrosion. Beim anderen Probekörper wurde die Horizontalanode mit der Stahlschalung elektrisch verbunden, so dass ein Makroelement mit galvanischer Anode entsteht. Die Stahlschalung ist dabei die Kathode.

Abb. 2: Verkabelte Probekörper: Probekörper mit Π-förmigen Anoden

Bei den Probekörpern mit den Π-förmigen Anoden wurden die Anoden mit der Stahlschalung elektrisch verbunden, damit ein Makroelement entsteht. Der Versuchsaufbau kann Abb. 1 entnommen werden. Abb. 2 zeigt den verkabelten Prüfkörper.

3.3.3. Versuchsablauf

Bei den Probekörpern mit den Π-förmigen Anoden wurden die Anoden mit der Stahlschalung elektrisch verbunden, damit ein Makroelement entsteht. Das Messintervall der Messgeräte war auf 1 Minute eingestellt. Die Messwerte wurden über einen Zeitraum von 24 Stunden aufgezeichnet.

3.4. Feldversuch mit galvanischen Anoden

3.4.1. Versuchsaufbau

Die Schal- und Bewehrungsarbeiten wurden wie üblich von Mitarbeitern der Herstellerfirma ausgeführt. Kurz vor dem Betonieren wurde das Betonelement instrumentiert. Die Abmessungen (L x B x H) des Elementes betragen 165 x 140 x 10 cm. Die beiden Aluminiumanoden und die beiden Sensoren (Messproben) wurden in grösstmöglichem gegenseitigem Abstand an der Bewehrung des Elementes befestigt. Dabei wurde darauf geachtet, dass kein direkter Kontakt zwischen Bewehrung und Anode resp. Sensor auftrat. Die genaue Anordnung der Instrumentierung im Bauteil kann der Abb. 3 entnommen werden.

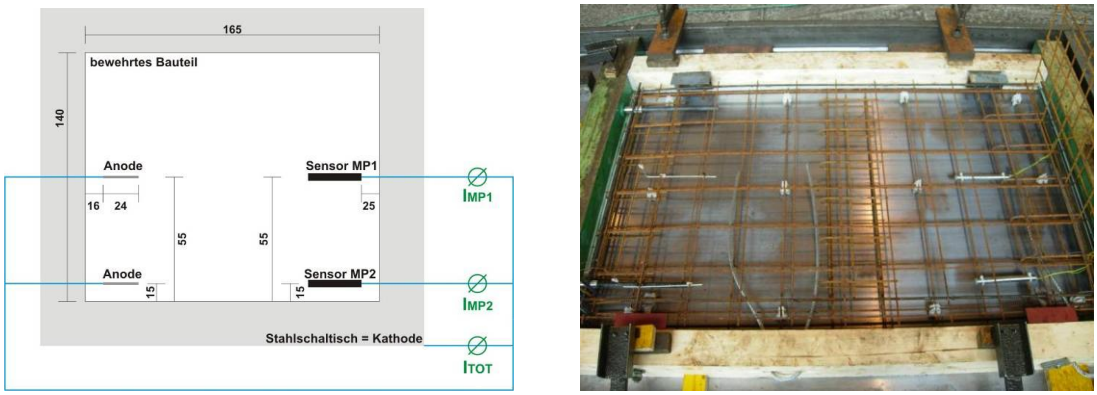


Abb. 3: Instrumentierung Betonelement. Links: Prinzipskizze (Abmessungen in cm) Rechts: Abbildung

Die Aluminiumanoden sind jeweils 24 cm lang und weisen einen Durchmesser von 2 mm auf. Sie sind an der oberen Bewehrungslage befestigt. Die Anoden können einzeln zu- und weggeschaltet werden. Die beiden Sensoren (Baustahl), die den Korrosionsstrom überwachen sind 2 cm lang und haben einen Durchmesser von 2 cm. Die Sensoren sind an der unteren Bewehrungslage befestigt. Am Ende der Sensoren (zur Anode hin) ist jeweils eine Referenzelektrode integriert.

3.4.2. Versuchsablauf

Nach der Instrumentierung und dem Start der Messungen konnte das Element betoniert werden. Das Messintervall der Messgeräte war auf 1 Minute programmiert. Der Betoniervorgang war nach 2 Minuten beendet. Ein Verdichten des Betons ist nicht nötig, da es sich um SCC-Beton handelt. Zu Beginn war nur die mittlere Anode angeschlossen. Um 30 Minuten nach dem Betonieren wurde die zweite Anode dazugeschaltet. Am nächsten Morgen um wurde das Element ausgeschalt und die Messung beendet.

3.5. Einsatz des Schutzsystems in der Praxis

Der Nachweis der Wirksamkeit der Schutzmethode sollte in der Praxisanwendung während mehrere Monate überprüft werden. Dazu wurde die galvanischen Anoden zusammen mit den erforderlichen Kabelanschlüssen an die ein Fertigbetonelementwerk geliefert. Das Personal wurde instruiert und die Ergebnisse der visuellen Beurteilung wurden in Protokollen festgehalten.

4. Resultate und Diskussion

4.1. Trennmittel

4.1.1. Elektrochemische Charakterisierung

Die Trennmittel sind direkt relevant für den Korrosionsprozess, da sie eine gewisse Trennschicht zwischen dem alkalischen Beton und der Stahloberfläche bilden. Bei dem Einsatz eines Schutzkonzepts auf Basis von Fremdstrom ist die Trennschicht relevant, da sie die effektive freie Stahloberfläche beeinflusst. Der aufzubringende Schutzstrom hängt daher nicht nur vom Trennmittel sondern auch von der aufgebrachten Menge und deren Verteilung ab. Die Ergebnisse der Untersuchung von fünf verschiedenen Trennmitteln sind in Abb. 4 dargestellt.

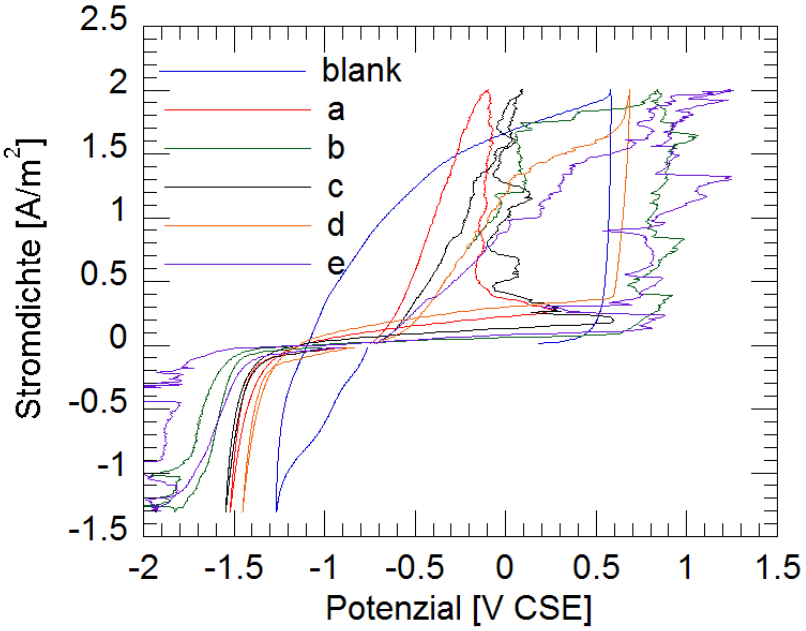


Abb. 4: Stromdichte-Potenzialkurven in Frischbeton ermittelt mit Stahlproben, welche mit verschiedenen Trennmitteln behandelt wurden. Zum Vergleich sind die Ergebnisse einer blanken Stahlprobe dargestellt.

Aus den Daten geht klar hervor, dass das elektrochemische Verhalten durch die Trennmittel beeinflusst wird und dass auch erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Trennmitteln auftreten. Die Streuung innerhalb derselben Trennmittel ist erheblich. Dies dürfte ein Effekt der unterschiedlichen Oberflächenbedeckung sein.

Das Schutzverfahren soll universell eingesetzt werden können und darf nicht auf ein spezifisches Trennmittel optimiert werden. Eine Regelung über den aufgebrachten Strom ist nicht möglich, da der Strombedarf in hohem Mass vom Trennmittel und von dessen Applikation abhängt.

4.1.2. Auslagerungsversuche in Beton

Zur Verifizierung der elektrochemischen Daten wurden die mit unterschiedlichen Trennmitteln behandelten Proben in einen chloridhaltigen CEM III/B Mörtel (Tabelle 1) eingebaut. Dabei handelt es sich um einen bewusst aggressiven Zement an der Grenze des von der

Norm zulässigen Bereichs. Die visuelle Beurteilung ist in den Abb. 5 dargestellt. Die Messungen zeigen, dass unter diesen Extrembedingungen tatsächlich Korrosion ausgelöst werden kann. Interessanterweise zeigt sich beim Trennmittel d, welches auch bei der elektrochemischen Untersuchung das beste Verhalten gezeigt hat, keine Korrosion.

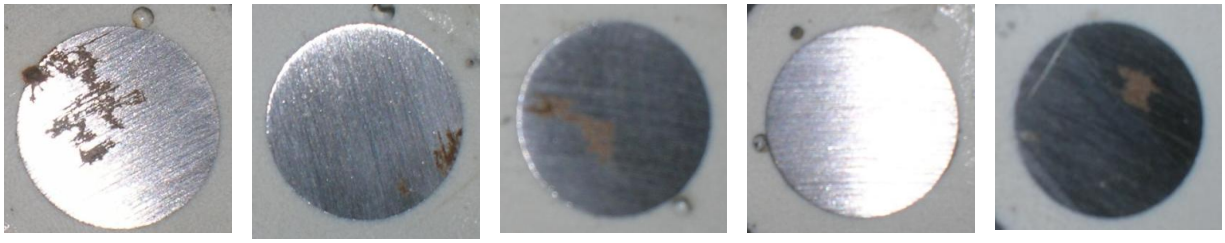


Abb. 5: Stahloberfläche nach dem Abbinden in chloridhaltigem CEM III/B behandelt mit verschiedenen Trennmitteln (von links nach rechts: a, b, c, d, e)

Offensichtlich haben die Trennmittel also einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten, was selbst unter vergleichsweise aggressiven Umgebungsbedingungen zu einem positiven Korrosionsverhalten führen kann.

4.2. Entwicklung eines Schutzstromgeräts

Bei der Entwicklung des Schutzstromgeräts waren verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. In den durchgeführten Untersuchungen musste festgestellt werden, dass die Verwendung eines Schutzstromgeräts nicht zielführend ist. Der Grund liegt in der Regelung der Betriebsparameter. Die Probleme werden im Folgenden diskutiert.

Korrosive Belastung der Bewehrung

Entsprechend dem ursprünglichen Schutzkonzept sollte die Bewehrung als Anode für die Stromeinspeisung verwendet werden. Dies hat den Nachteil, dass der elektrische Stromfluss zu einer korrosiven Belastung der Bewehrung führen kann. Für die Illustration der Problematik kann das Poubaixdiagramm [3] (Abb. 6) herangezogen werden. Der Stromfluss führt zu einem Absinken des Potenzials der Schalung bis zur Wasserstoffentwicklung und eine Erhöhung des Potenzials der Bewehrung bis zur Sauerstoffentwicklung. Im Falle der Schalung wird der pH Wert Ansteigen und das Auftreten von Korrosion verhindert. Bei der Bewehrung führt dies zum Anheben des Potenzials und zur Absenkung des pH-Werts. Das hohe Potenzial und die Verringerung des pH-Werts können zur Aktivierung von Korrosion führen. Dies ist in einem Versuch mit Quarzsand dargestellt, welcher mit alkalischer Lösung getränkt wurde (Abb. 7). Aus den Messungen geht hervor, dass abhängig von der Stromdichte und der Alkalinität die Ladungsmenge bis zur Aktivierung von Korrosion stark variieren kann. Für die im Beton relevanten pH Werte zwischen 12.5 bis 13.2 muss folglich mit Korrosion gerechnet werden wenn grössere anodische Ströme fliessen. Diese Gefährdung steigt mit zunehmendem Chloridgehalt und sinkendem pH-Wert. Ein sinkender pH-Wert ist im Zusammenhang mit dem Vermehrten Einsatz von CEM II und III generell zu erwarten und die Erfahrung zeigt, dass die von der Norm zulässigen maximalen Chloridgehalte von 0.2 % bezogen auf den Zement ausgeschöpft werden dürften.

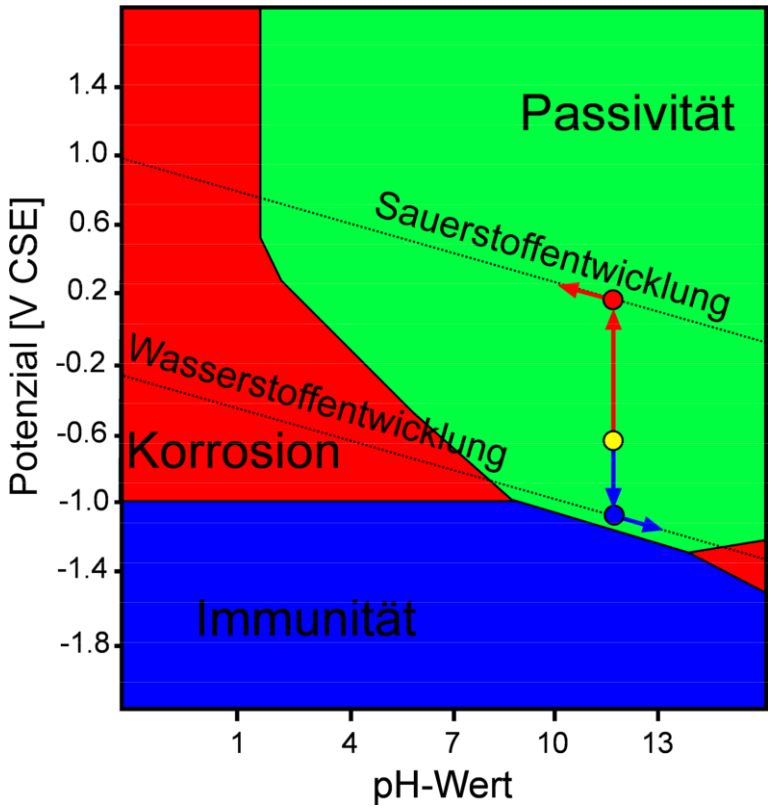


Abb. 6: **Pourbaixdiagramm für Stahl. Ausgehend vom gelben Punkt verschiebt sich die Bewehrung entsprechend den roten Pfeilen und die Schalung entsprechend den blauen Pfeilen.**

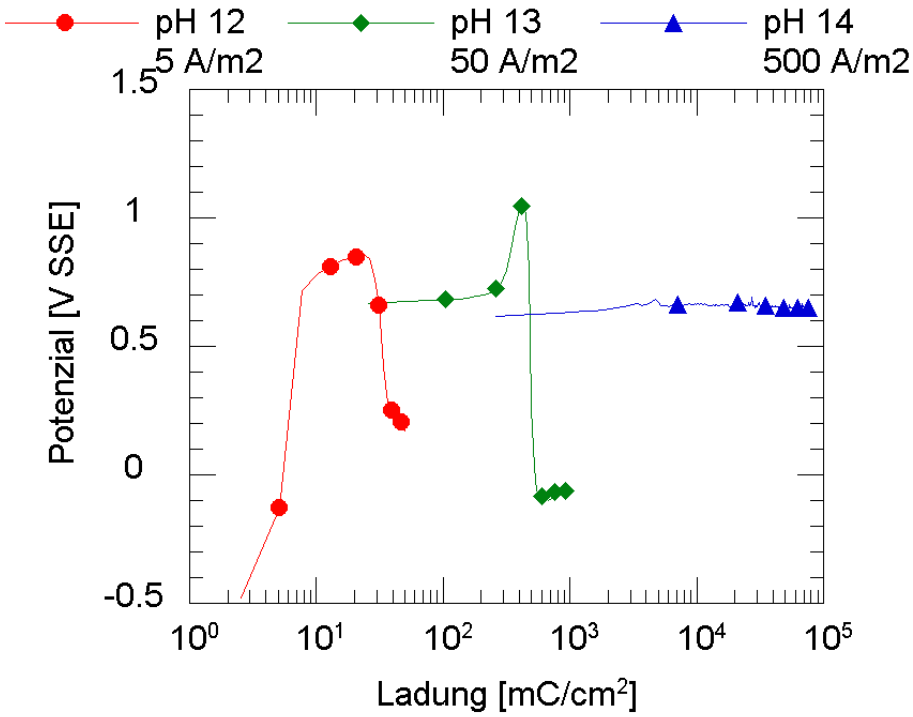


Abb. 7: **Potenzialverlauf unter anodischer Stromeinwirkung von Stahl in Sand getränkt mit alkalischen Lösungen. Das Absinken des pH-Werts äussert sich in einem Potenzialanstieg, während die Aktivierung von Korrosion durch ein Absinken des Potenzials angezeigt wird.**

Spannungsregelung

Da das Trennmittel eine Regelung des Schutzstroms nicht zulässt, musste eine alternative Lösung gefunden werden. Dabei steht ein quasitpotentiostatischer Betrieb des Schutzstromgeräts im Vordergrund. Aus dem Pourbaixdiagramm (Abb. 6) wird klar, dass sich bei kathodischem Schutz die effektiv auftretende Spannung zwischen der Sauerstoff- und der Wasserstoffentwicklung einstellen muss. Thermodynamisch muss diese Spannungsdifferenz 1.24 V betragen. Wenn folglich die Ausgangsspannung am Schutzstromgerät auf diesen Wert begrenzt wird, muss sich der Schutzstrom automatisch so einstellen, dass sich an der Stahlschalung (Kathode) ein optimaler Korrosionsschutz einstellt, unabhängig von der Art und Oberflächenbelegung der Stahloberfläche. Aufgrund verschiedener Versuche zeigte sich, dass diese Überlegung zwar prinzipiell richtig ist. Sobald aber an der Bewehrung (Anode) Korrosion ausgelöst wird, wird deren Potenzial absinken (vergleiche Abb. 7) und der Schutzstrom kann beliebig ansteigen.

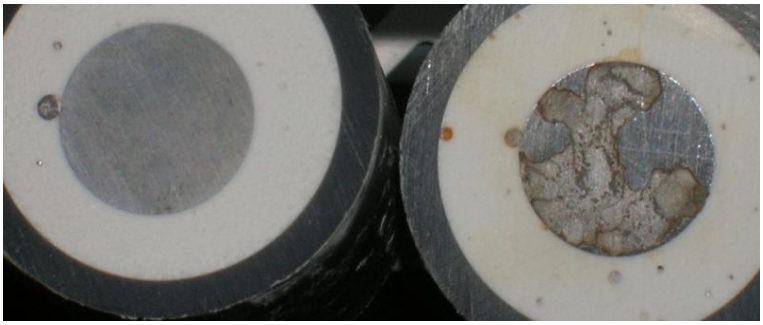


Abb. 8: **Visuelle Beurteilung von Kathode (rechts) und Anode (links) nach dem Abbinden des Mörtels. Die Ausgangsspannung betrug 1.4 V.**

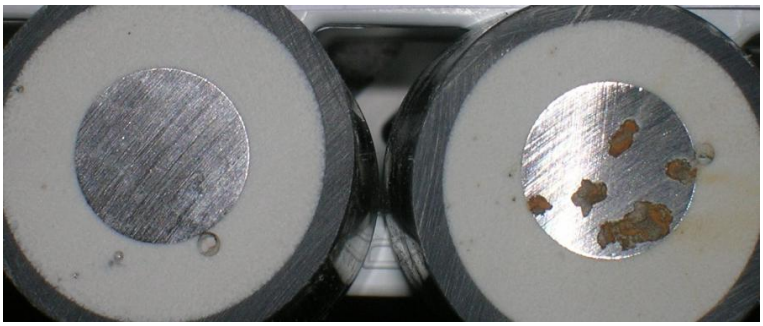


Abb. 9: **Visuelle Beurteilung von Kathode (rechts) und Anode (links) nach dem Abbinden des Mörtels. Die Ausgangsspannung betrug 1 V.**

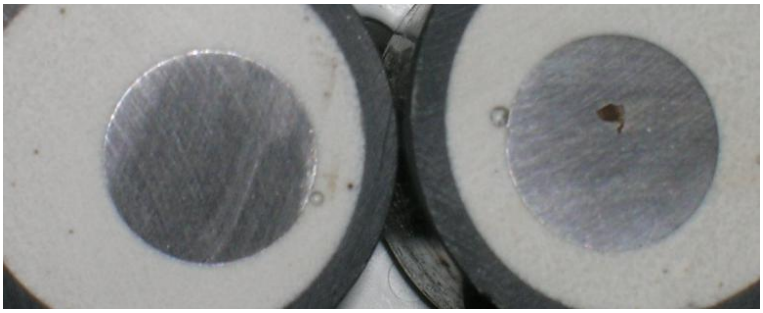


Abb. 10: **Visuelle Beurteilung von Kathode (rechts) und Anode (links) nach dem Abbinden des Mörtels. Die Ausgangsspannung betrug 1.4 V und es wurde ein Widerstand von 50 kΩ eingebaut.**

Dies hat zur Folge, dass es an der Stahlschalung zu starker Wasserstoffentwicklung kommt, was zu Blasenbildung auf der Oberfläche des Betonelements führt. Gleichzeigt kann die Korrosion an der Bewehrung erhebliche Ausmasse annehmen. Die so initiierte Korrosion kann unter ungünstigen Bedingungen bestehen bleiben und zu einem frühzeitigen Versagen des Bauteils führen.

In der Folge wurde versucht, den Stromfluss zusätzlich mit einem elektrischen Widerstand zu begrenzen. Diese Massnahme war aber nicht erfolgreich, da das Auslösen von Korrosion an der Bewehrung nicht verhindert werden konnte.

Typische Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 8-Abb. 10 dargestellt. Die Kathoden (Schalung) wurde mit dem Trennmittel a vorbehandelt und der Mörtel hätte aufgrund von Abb. 5 zu Korrosion geführt. Die Ergebnisse zeigen somit klar, dass der kathodische Korrosionsschutz das Auftreten von Korrosion an der Schalung verhindern kann, dass es aber zu Korrosionsangriffen an der Bewehrung kommt.

Lösungsansatz

Selbst unter Zuhilfenahme von aufwändigen Steuergeräten, wie beispielsweise einem potenzialgeregeltem Schutzstromgerät lässt sich die Problematik der Bewehrungskorrosion nicht beheben. Die einzige Lösung besteht darin, anstelle der Bewehrung eine unabhängige Anode einzubauen. Diese muss elektrisch von der Bewehrung getrennt sein. Die Evaluation von verschiedenen Materialen hat ergeben, dass lediglich mit einer Inertanode aus aktiviertem Titan das Auftreten von Korrosion und damit die Bildung von Verfärbungen nachhaltig verhindert werden kann.

Angesichts des Kostendrucks bei der Produktion von Fertigbetonelementen lassen sich die Investitionskosten in die Infrastruktur kaum rechtfertigen. Da aufgrund der durchgeführten Versuche der Einsatz von Anoden erforderlich ist, ergibt sich die Möglichkeit anstelle eines Fremdstromschutzsystems auf galvanische Anoden zurückzugreifen. Dies hat den grossen Vorteil, dass keinerlei Investitionen in Schutzstromgeräte erforderlich sind. Vielmehr erzeugen die galvanischen Anoden den für den Schutz der Stahlschalung erforderlichen Strom selbst.

4.3. Laborversuch mit galvanischen Anoden

Der gemessene Strom der Π-förmigen Al-Anode im Makroelement verhält sich beinahe identisch mit den Messergebnissen einer horizontalen Al-Anode im Makroelement. Der Strom fällt in den ersten Stunden stark ab, danach pendelt er sich um einen asymptotischen Wert ein.

Der Strom im Makroelement mit der Π-förmigen Zink-Anode ist nur etwa 1/10 bis 1/20 so gross wie derjenige der Al-Anode. Aufgrund der exakt gleichen Anodengeometrie können die Ströme direkt verglichen werden. Der Strom nimmt ebenfalls mit der Zeit ab, bis er einen konstanten Wert nahe 0 annimmt (Abb. 11).

Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper visuell betrachtet (Abb. 12). Die Betonoberfläche des Probekörpers mit der Zinkanode weist keine sichtbaren Schäden auf. Bei der Oberfläche des Probekörpers mit der Al-Anode hingegen sind wiederum Spuren der Wasserstoffbildung sichtbar.

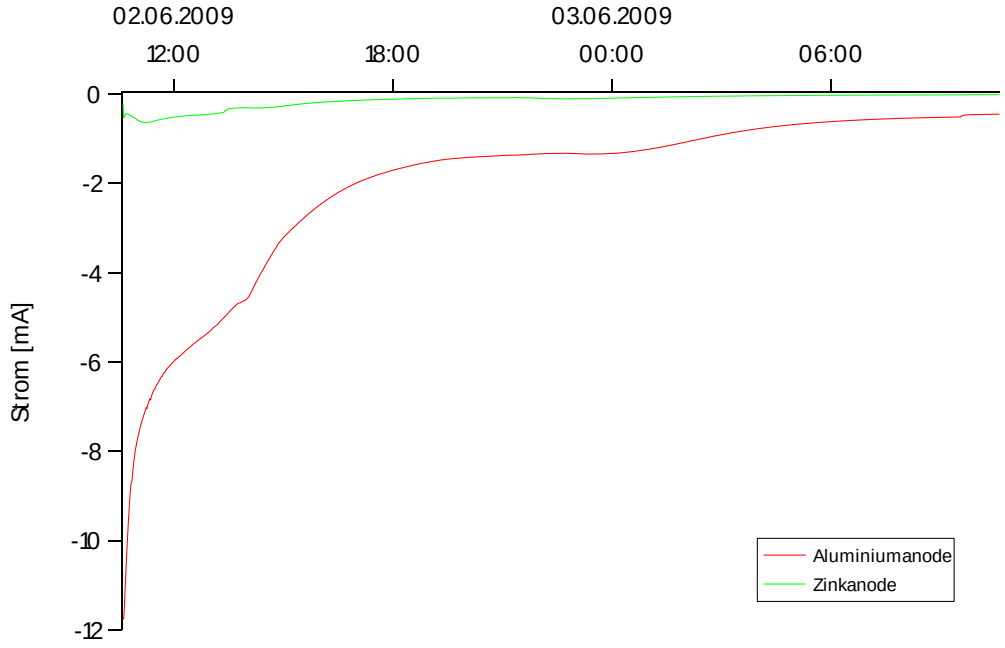


Abb. 11: **Gemessener Strom der Al- und Zinkanode in den Probekörpern im Laborversuch mit Π-förmigen Anoden**

Abb. 12: **Betonoberflächen der Probekörper im Laborversuch mit Π-förmigen Anoden Links: Probekörper mit Zink-Anode, keine sichtbaren Schäden. Rechts: Probekörper mit Al-Anode, raue Oberfläche in Folge Wasserstoffbildung**

Durch die Auflösung der Al-Anoden und den somit verbundenen kleineren Durchmesser besteht theoretisch die Möglichkeit die Al-Anode nach dem Ausschalen aus dem Probekörper herauszuziehen. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Anode vollkommen gerade ist und deren Halterung ein Ausziehen erlaubt.

4.4. Feldversuch galvanischen Anoden

Die mit den in die beiden Sensoren integrierten Referenzelektroden gemessenen Potentiale sind trotz ihrer unterschiedlichen Lage im Betonelement beinahe identisch. Zu Beginn sinkt das Potential stark ab. Wahrscheinlich wird der Stahl bis in die Wasserstoffentwicklung pola-

risiert. Danach steigen die gemessenen Potentialwerte im Verlauf der Messung kontinuierlich an, sind aber immer noch stark negativ (Abb. 13).

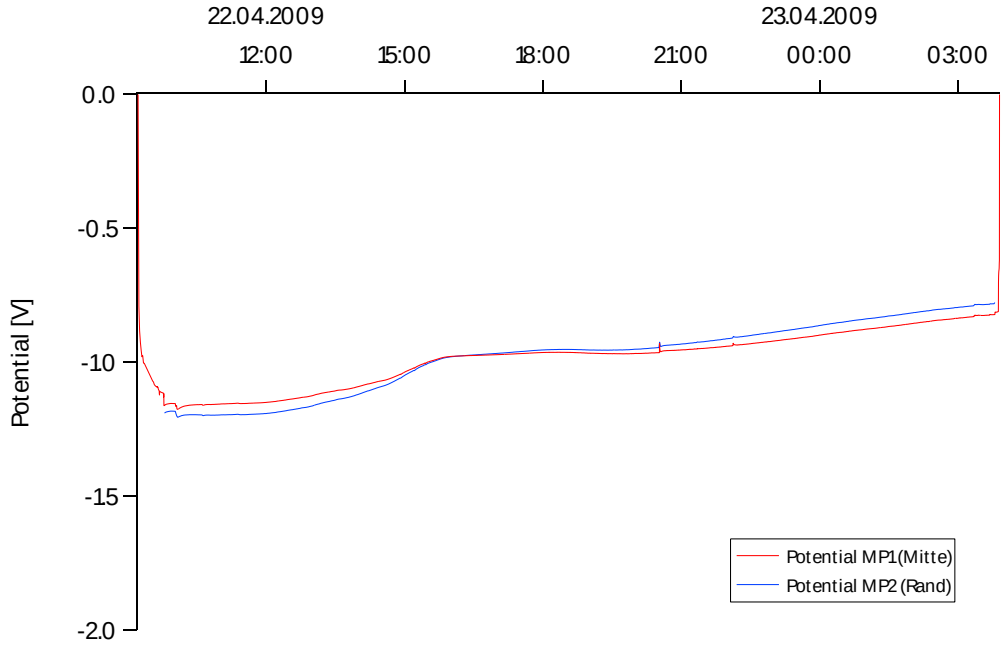


Abb. 13: Potentiale der beiden Referenzelektroden im Probekörper im Feldversuch

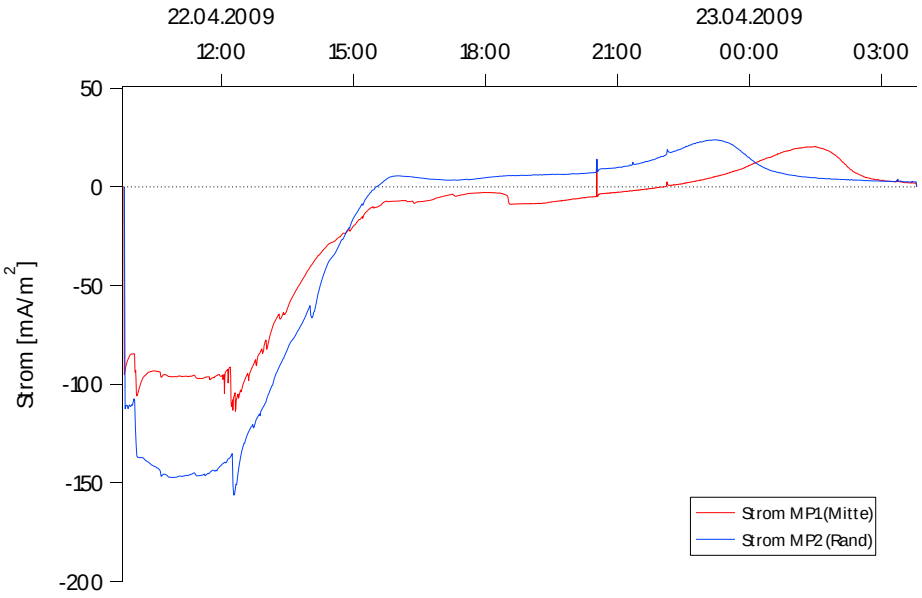


Abb. 14: Ströme der beiden Messproben im Feldversuch

Die gemessenen Ströme der Messproben wurden in Stromdichten umgerechnet. Dabei wird von einer gleichmässigen Stromverteilung ausgegangen. Somit zeigt die Kurve einen Mittelwert. Zu Beginn der Aushärtungszeit des Betons in der Schalung wurde ein sehr grosser Schutzstrom von 100 bis 150 mA/m2 an der Messprobe (je nach Standort) registriert. Die Stromdichte bezieht sich dabei auf die Stahloberfläche der Messprobe. Nach ein paar Stunden nimmt der kathodische Strom stark ab. Der gemessene Strom wird sogar anodisch,

was wahrscheinlich auf Oxidationsprozesse an der Stahloberfläche (Passivfilmbildung) zurückgeführt werden kann (Abb. 14).

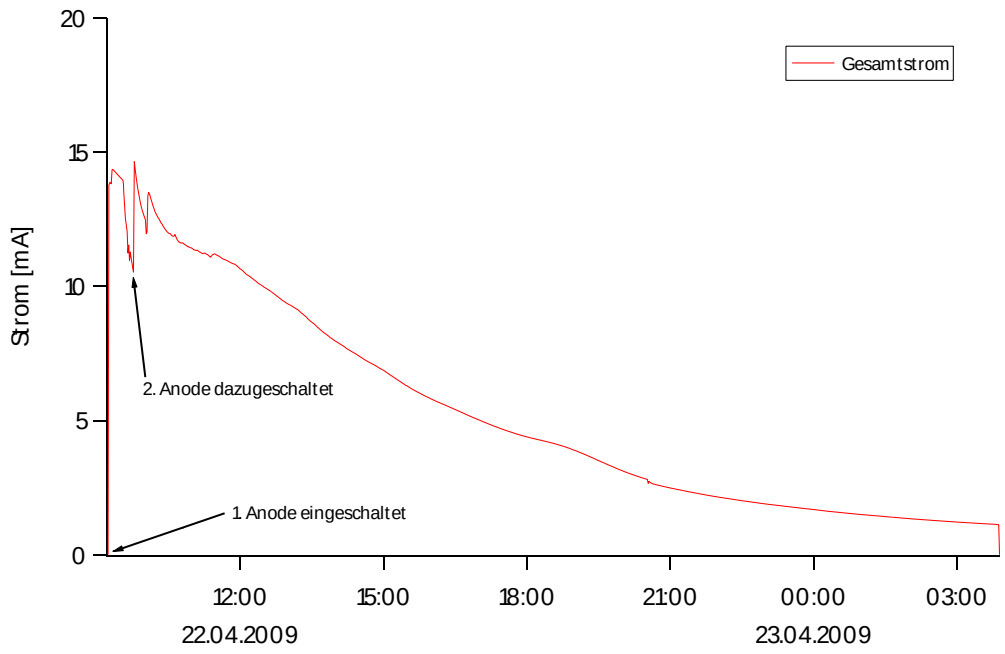


Abb. 15: Gesamtstrom im Betonelement im Feldversuch

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Betrachtung des Gesamtstromes zwischen Aluminium-Anode und Stahlschaltisch. Das Dazuschalten einer zweiten Anode erhöht den Schutzstrom zwischenzeitlich. Im weiteren Verlauf der Messung fällt der Gesamtstrom immer weiter zusammen (Abb. 15).

4.5. Einsatz des Schutzsystems in der Praxis

Der Einsatz des Schutzsystems in der Industriellen Anwendung wurde Ende Oktober 2009 aufgenommen und bis Ende Januar aufrechterhalten. Dabei wurden zwei benachbarte Schaltische bezüglich Korrosionserscheinungen beurteilt. Das Schutzsystem wurde lediglich bei einem Schaltisch eingesetzt. Der Versuch während den späten Herbstmonaten wurde bewusst gewählt, da sich in diesem Zeitraum erfahrungsgemäss die Probleme mit Korrosion an den Schaltischen häufen. Leider konnte während der gesamten Versuchsdauer weder am geschützten noch am nicht geschützten Schaltisch Korrosionsprobleme festgestellt werden. Damit konnte der Nachweis der Wirksamkeit des Verfahrens in der industriellen Anwendung nicht erbracht werden.

Aufgrund der Untersuchung wurde aber festgestellt, dass sich der Einsatz des Systems problemlos in den Arbeitsablauf integrieren lässt. Es ist somit mit keinen wesentlichen Mehrkosten für den Einsatz des Systems zu rechnen. Die Kosten beschränken sich somit auf den Aluminiumdraht und die für die Installation erforderlichen Halterungen.

Im Rahmen der des Praxistest konnte zudem festgestellt werden, dass es zu keiner Beeinträchtigung der Betonoberfläche durch Bildung von Blasen oder zu einem veränderten Abbindeverhalten des Betons kommt.

4.6. Schlussfolgerungen

Die Messungen im Feldversuch haben gezeigt, dass vor allem in den ersten Stunden nach dem Betonieren der Stahlschaltisch durch die Aluminiumanode vor Korrosion geschützt werden kann. Die Verringerung der Sauerstoffkonzentration, die Absenkung des Potenzials der Schalung unter das Lochfrasspotenzial, die Erhöhung des pH-Werts, die Verringerung der Konzentration von Chloriden an der Schalungsoberfläche und die Unterdrückung von Makroelementen bewirken gesamthaft eine Verbesserung der Korrosionssituation.

Grösse Aluminiumanode

Für die Dimensionierung der Aluminiumanoden ist es wichtig, dass man die benötigte Ladungsmenge kennt. Dazu bildet man das Integral des Gesamtstroms über die Zeit. Aus der geflossenen Ladungsmenge kann dann auf den Umfang der Aluminiumauflösung geschlossen werden. Daraus kann die Grösse der Aluminiumanode berechnet werden, wobei allerdings der Ausbreitwiderstand der Aluminiumanode eine wichtige Rolle spielt.

Die Auflösung der Aluminiumanode kann gemäss Formel 1 direkt im Auswertungsprogramm berechnet werden:

- Aluminiumanode Q = 350.812 C = 350.182 As

Aus der ermittelten Ladungsmenge berechnet sich der Massenverlust des Aluminiums mit folgender Formel 2:

$$m = \frac{Q * M}{z * F} = \frac{350.812 * 26.982}{3 * 9.65 * 10^4} = 0.032g = 32mg \qquad (2)$$

Q = 350.812 C = geflossene Ladung
M = 26.982 g/mol = molare Masse von Al
z = 3 = elektrochemische Wertigkeit von Al
F = 9.65*104 As/mol = Faraday-Konstante

Die Abtragstiefe lässt sich mit der Annahme eines gleichmässigen Abtrages mit folgenden Formeln 3 und 4 wie folgt berechnen:

$$V = \frac{m}{\rho} = d * \pi * L * t \qquad (3)$$

$$\rightarrow t = \frac{m}{\rho * d * \pi * L} = \frac{0.032}{2.71 * 0.2 * \pi * 24} = 0.007mm = 7\mu m \qquad (4)$$

m = 0.032 g = Massenverlust Al
ρ = 2.71 g/cm^3 = Diche von Al
d = 0.2 cm = Durchmesser Al-Anode
L 24 cm = Länge Al-Anode

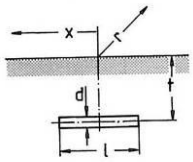
Die Berechnung zeigt, dass der Massenverlust minim ist. Auf Grund des Massenverlustes wäre auch der Einsatz einer kleineren Aluminiumanode möglich. Da aber der Ausbreitwiderstand mit kleinerer Anodenlänge zunimmt, ist dies bei der Bestimmung der Anodengrösse zu berücksichtigen. Mit folgender Formel 5 (Tabelle 2) kann der Ausbreitwiderstand einer Horizontalanode (Länge L, Durchmesser d, Einbetttiefe t) berechnet werden:

Tabelle 2: Formel für den Ausbreitwiderstand von Anoden [1]

Horizontalanode

(d << l, t << l)

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * l} * \ln(\frac{l^2}{t * d}) \qquad (5)$$



Der spezifische Widerstand ρ des Betons kann mit Formel 5 berechnet werden. Zur Vereinfachung wird dieser als über die Zeit konstant angenommen:

- Spezifischer Widerstand ρ = 171 Ωcm

  mit R = 8 Ω = Ausbreitwiderstand Al-Anode (gemessen)

  L = 24 cm = Länge Al-Anode

  d = 0.2 cm = Durchmesser Al-Anode

  t = 2.5 cm = geringste Überdeckung Al-Anode

  ($h_{Bauteil}$ = 10 cm, c_{nom} = 2 cm, $Ø_{Eisen}$ = 0.6 cm)

Nachfolgende Tabelle 3 zeigt den Einfluss der Länge der Al-Anode auf den Ausbreitwiderstand (mit t = 2.5 cm, ρ = 171 Ωcm, d = 0.2 cm):

Tabelle 3: Abhängigkeit des Ausbreitwiderstandes von der Anodenlänge

Länge Al-Anode L [cm]	Ausbreitwiderstand Al-Anode R [Ω]
24	7.9
20	9.1
16	10.6
12	12.8
8	16.5
4	23.5

Tabelle 3 zeigt, dass der Ausbreitwiderstand erst bei sehr kleinen Anoden stark zunimmt. Weiter zu berücksichtigen ist, dass sich auf dem Aluminium mit der Zeit eine isolierende Oxidschicht bildet. Der Einfluss dieser Oxidschicht wurde mit den Laborversuchen untersucht.

Gefahr der Rissbildung

Die Gefahr der Rissbildung kann im Laborversuch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Bei Konfigurationen mit kleiner Überdeckung von 10 mm und grosser Stromstärke hat sich ein Riss, welcher parallel zur eingebetteten Anode verläuft, gebildet. Die Gefahr der Rissbildung hängt in erster Linie von der Überdeckung und vom Durchmesser der Anode ab.

Bei den vertikal eingestellten Π-förmigen Anoden kann auf Grund ihrer Lage die Gefahr der Rissbildung im Gegensatz zu den Horizontal-Anoden als klein betrachtet werden, da diese nicht parallel zur Betonoberfläche verlaufen.

Gefahr der Wasserstoffbildung

Die Versuche haben gezeigt, dass der gemessene Strom sehr gross ist. Beachtet man die relativ kleine Kathodenfläche der Schalung so entstehen grosse Stromdichten, welche zu Wasserstoffbildung zwischen Beton und Schalung führen können. Durch die Wasserstoffbildung entsteht eine raue Betonoberfläche, welche nicht mehr als Sichtbeton geeignet ist.

Wirksamkeit der verwendeten Anoden

Al-Anode: Die Anoden aus Aluminium sind sehr unedel, weshalb ein starkes galvanisches Element mit grossen Strömen entsteht. Die Messungen haben gezeigt, dass die Position und Lage der Al-Anoden im Probekörper (und somit unterschiedliche Ausbreitwiderstände) keinen Einfluss auf den gemessen Strom haben.

Zinkanode: Die Makroelemente mit Zink-Anoden liefern nur sehr wenig Schutzstrom.

4.6.1. Vergleich Feld- und Laborversuch

Die gemessenen Ströme zwischen den Al-Anoden und der Schalung (Kathode) verhalten sich beinahe identisch und bewegen sich in derselben Grössenordnung (um 16 mA). Im Gegensatz zu den Laborversuchen ist beim Feldversuch im Fertigteilwerk die genaue Kathodenfläche nicht bekannt. Auf Grund des verwendeten Trennmittels kann die exakte Grösse der Kathodenfläche nicht ermittelt werden.

Die Bildung von Wasserstoff konnte während des Feldversuchs im Gegensatz zu den Laborversuchen nicht beobachtet werden. Dies hängt mit den unterschiedlichen Kathodengrössen und somit unterschiedlichen fliessenden Stromdichten zusammen.

Die Wirksamkeit der galvanischen Al-Anoden als Korrosionsschutz kann sowohl im Labor als auch im Feld nachgewiesen werden.

5. Bedeutung für die Praxis

Die Problematik der Korrosion an Stahlschalungen führt zu erheblichen Einbussen in der Oberflächenqualität der Betonelemente und führt in Mehrkosten oder Verzögerungen in der Produktion. Da die Korrosion meist nur während bestimmten Zeiträumen auftritt und von verschiedenen externen Parametern abhängt, lässt sie sich kaum kontrollieren oder direkt beeinflussen. Mit Hilfe des entwickelten Schutzsystems ist nun ein Verfahren verfügbar, welches mit geringem Mehrkostenaufwand die Korrosionssituation der Stahlschalung verhindern oder zumindest verringern kann.

6. Empfehlungen für die weitere Umsetzung

Die Idee, korrosionsgefährdete Stahlschalungen durch im Frischbeton eingelegte galvanische Anoden zu schützen, kann aufgrund der durchgeführten Arbeit als erfolgversprechend beurteilt werden. Sowohl der Feldversuch als auch die Laborversuche ergeben für die Al-Anoden sehr hohe Ströme, welche eine ausreichende Schutzwirkung ermöglichen. Die Stahlschalung wird während des Aushärtevorgangs des Betons kathodisch geschützt.

Da bisher keine abschliessende Erklärung für die Korrosion der Stahlschalung vorliegt, kann nicht mit Sicherheit gefolgert werden, dass das entwickelte Verfahren jede Korrosion verhindern kann. Es wird aber empfohlen beim Auftreten von Korrosionsproblemen an der Schalung das Schutzsystem konsequent anzuwenden. Die Erfahrungen mit dem Schutzsystem sollen an die SGK weitergeleitet werden.

7. Finanzielles

Die Seitens der cemsuisse übernommmenen Kosten belaufen sich auf Fr. 75'000. Diese Projektfinanzierung hat die Aufwendungen der SGK für die geleisteten Arbeiten weitgehend gedeckt. Der Mehraufwand konnte als Forschung und Entwicklung abgebucht werden.

8. Literatur

1. D. Meyer, J. Triebert, W.-D. Schulz, "Korrosionserscheinungen beim Herstellen von Betonfertigteilen in Stahlschalungen", *Materials and Corrosion* **56**, 334 (2005).
2. E. Bohlmann, P. Boos, R. Härdtl, "Rust formation on steel forms in precast plants: Causes and measures for prevention", *Betonwerk und Fertigteil- Technik* **72**, 48 (2006).
3. M. Pourbaix, "Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions". (NACE, Houston, TX, 1974).

Dr. Martin Brem

Dr. Markus Büchler