

# Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl am Beispiel einer Parkgarage in Norwegen

## EINLEITUNG

In Norwegen sind viele Parkgaragen durch Korrosion des Bewehrungsstahls in den Betondecken stark in Mitleidenschaft gezogen. Der an den parkenden Autos anhaftende Schnee ist salzhaltig und verursacht nach Abschmelzen durch Eindringen des salzhaltigen Wassers in den Beton Korrosion der Bewehrung. Ein sicherer Hinweis auf diese Korrosionsaktivität ist gerissener und gebrochener Beton, der nicht nur unansehnlich, sondern auch gefährlich ist. Durch ungehinderte Korrosion brechen aus der Decke Betonteile heraus und führen in schlimmen Fällen zu größeren strukturellen Schäden. Aufwändige Betoninstandsetzungen sind nicht nur störend für die Benutzer, sondern bedeuten oft auch entgangene Erträge. Vorbeugende Maßnahmen zur Korrosionsbekämpfung sind ein guter Ansatz zur Verlängerung der Lebensdauer von Parkgaragen.

Im vorliegenden Bericht wird anhand eines Praxisbeispiels der Zustand einer Parkgarage aufgezeigt, die Anwendung

von kathodischem Korrosionsschutz als Schutzmaßnahme beschrieben, und die Effekte dieser Schutzmaßnahme über einen längeren Zeitraum diskutiert.

## ZUR AUSGANGSLAGE

### Das Bauwerk

Die Parkgarage wurde ca. 1976 errichtet und die tragenden Konstruktionen aller drei Ebenen wurden in Ortbeton ausgeführt. Die untere Ebene ist durch Wände an allen Seiten begrenzt und verfügt über einen Asphaltbelag auf Grund. Betonwände begrenzen die zweite Ebene an drei Seiten und eine Säulenreihe an der Westseite (Einfahrt). Die oberste Ebene verfügt südseitig über eine Betonwand und über Säulenreihen an den übrigen Seiten. Die Parkgarage grenzt an zwei Wohnblöcke an und ist den Plänen gemäß auf felsigem Untergrund errichtet (siehe Abb. 1 - 3).

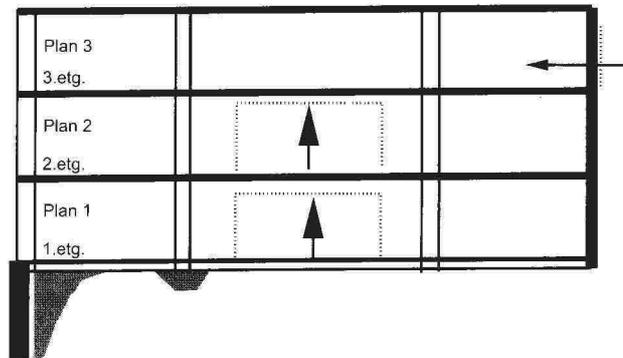
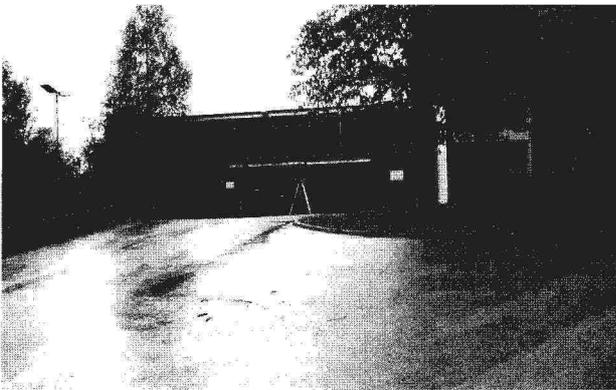


Abb. 1 Einfahrt zu Ebene 2 (links) und Querschnitt der drei Ebenen (rechts)

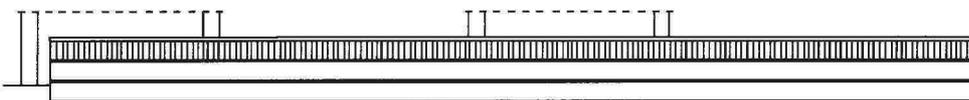


Abb. 2 Längsansicht der Parkgarage

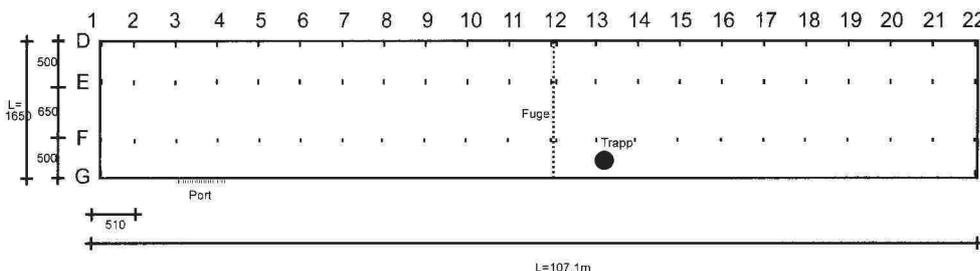


Abb. 3 Schnitt von Ebene 3

## Bauwerkszustand und Maßnahmenempfehlung

Ein Bericht über die Erfassung des Zustands der Parkgarage, datierend August 1998, beschrieb gefährliche Chloridgehalte in Teilen der Garagendecken. Die Proben, entnommen an den Deckenunterseiten, wiesen ungefährliche Chloridmengen ( $< 0,4\%$  auf das Zementgewicht bezogen) auf, jedoch an Betonproben, entnommen an der Deckenoberseite von Ebene 2 und 3, wurden so stark erhöhte Chloridkonzentrationen gemessen, dass Bewehrungskorrosion wahrscheinlich war. Zusätzlich wurde ein hoher Karbonatisierungsgrad festgestellt. Das Bauwerk ist aus statischer Sicht relativ schwach dimensioniert, an der Deckenoberseite fand man Abplatzungen und die Wasserabführung war nicht zufriedenstellend.

Das zuständige Bausachverständigenbüro empfahl eine Sanierung der Betonschäden und Anwendung von kathodischem Schutz der Bewehrung der Deckenoberseite mit Oberflächenbehandlung der Deckenoberseite zwecks Verhinderung zukünftiger Salzeindringung. Die Massenzunahme der Betondecke sollte wegen der schwachen Dimensionierung so niedrig wie möglich gehalten werden. Kathodischer Schutz wurde auch für die Deckenunterseite und die Säulen angeraten.

Letztendlich wurde empfohlen, dass der zum Zug kommende Unternehmer eine Bauwerksuntersuchung in Eigenregie durchführt, um den kathodischen Korrosionsschutz auf die tatsächlich zu schützenden Areale zu begrenzen (Erwartung einer Kostenersparnis).

## Der Sanierungsvorschlag der bauausführenden Firma

Im Juni 1999 wurde der Firma Protector der Auftrag zur Sanierung der Parkgarage erteilt.

Der Vertrag umfasste folgende Punkte:

- Bauwerksuntersuchung (zur Bestimmung der Areale\*)
- Ausarbeitung der Konzeptlösung für den kathodischen Schutz\*\*)
- Installation des kathodischen Schutzes mit der ZEBRA-Dünnschichtanode an Betondecken, tragenden Wänden und Säulen
- Beschichtung der Anode und Betondecken mit Schutzbelag
- CO<sub>2</sub>-Bremse an den übrigen Flächen
- Fassadenerneuerung, Auswechseln der Fassadenplatten
- Fernüberwachung und Fernsteuerung des Schutzsystems
- sechs Jahre Servicegarantie

\*) Der Bericht zur Bauwerksuntersuchung wurde im Frühjahr 1999 durchgeführt.

\*\*\*) Die Konzeptlösung datiert Dezember 1999

## Bauwerksuntersuchung zur Begrenzung der zu schützenden Areale

Die Zielsetzung der Bauwerksuntersuchung war, sich ein detaillierteres Bild über den Zustand zu verschaffen, was zu einer auch ökonomisch optimalen Behandlung führen sollte. Zum Beispiel zu Reduktion der zu schützenden Bereiche, gleichbedeutend einer Kostenersparnis.

Folgende Parameter wurden in der Untersuchung berücksichtigt:

- das elektrochemische Potential der Bewehrung
- der elektrolytische Betonwiderstand
- die Betonüberdeckung
- der Chloridgehalt des Betons
- Frost/Tausalz-Schäden
- Karbonatisierungstiefe
- die elektrisch durchleitende Verbindung der Bewehrung

Alle Parameter gingen in die Bewertung ein.

## Zur Interpretation der einzelnen Parameter

### Elektrochemisches Potential der Bewehrung (Korrosionspotential):

Als Faustregel gilt: Werte, negativer als  $-350\text{ mV}$  gegen  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4, \text{ ges.}$  bedeuten Korrosion der Bewehrung mit  $95\%$ iger Sicherheit. Werte positiver als  $-200\text{ mV}$  gegen  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4, \text{ ges.}$  bedeuten einen korrosionsfreien Zustand mit  $95\%$ iger Sicherheit. Werte dazwischen sind mit Potentialmessungen alleine nicht interpretierbar [1].

### Chloridgehalt des Betons:

Chloridionen können in den Beton je nach Qualität mehr oder weniger rasch eindringen. Erhöht sich der Chloridgehalt an der Bewehrungsoberfläche über eine kritische Menge hinaus, bricht die Passivschicht zusammen und der Korrosionsvorgang setzt ein. Der korrosionsauslösende Chloridgehalt wird in der Literatur mit Werten zwischen  $0,17$  und  $2,5\%$  angegeben [2]. Als pragmatisches Kriterium für den kritischen Chloridgehalt für die schlaffe Bewehrung wurde  $0,4\%$ , auf das Zementgewicht bezogen, eingesetzt.

### Frost/Tausalz-Schäden:

Wenn Frost/Tausalz-Schäden auf der Deckenoberseite auftraten, wurde davon ausgegangen, dass an diesen Stellen auch der Chloridgehalt des Betons hoch war. Frost/Tausalz-Schäden treten auf, wenn Beton durch eine salzhaltige Eis/Wasser-Mischung rasch abgekühlt wird. Durch die Volumsvergrößerung des Eises in den Poren wird der Beton in Folge geschädigt.

### Karbonatisierungstiefe:

Als Karbonatisierung bezeichnet man die Umwandlung des Portlandites ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ca.  $20\%$  der Zementpaste) zu Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Der Portlandit kann als Reservoir

für Hydroxylionen (Alkalität) angesehen werden, welche für die Aufrechterhaltung der Passivschicht sorgen. Geringe Alkalität im Porenwasser, verursacht durch Karbonatisierung, erhöht das Korrosionsrisiko durch Zerstörung der Passivschicht. Die Karbonatisierung geschieht von außen nach innen. Die Geschwindigkeit ist wiederum abhängig von der Betonqualität. Eine Kombination von karbonatisiertem und chloridhaltigen Beton führt in der Regel zu äußerst aggressiver Korrosion der Bewehrung.

#### Elektrolytischer Betonwiderstand:

Der Betonwiderstand hat einen direkten Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit einer bereits korrodierenden Bewehrung. Der elektrische Strom, generiert durch den Korrosionsprozess, wird durch die Widerstände im elektrischen Stromkreis der Korrosionszelle begrenzt. Diese sind der Übergangswiderstand Eisen/Beton und der Betonwiderstand. Ist die Summe der Widerstände hoch genug, wird die Korrosionsgeschwindigkeit verschwindend klein. Bei spezifischen Betonwiderständen höher als 50 bis 70 kΩcm ist die Korrosionsgeschwindigkeit zu vernachlässigen [3].

#### Elektrisch durchleitende Verbindung der Bewehrung:

Voraussetzung für eine erfolgreiche Installation von kathodischem Schutz ist die durchgehende elektrische Verbindung der gesamten Bewehrung. Ist diese nicht gegeben, wird die elektrisch isolierte Bewehrung bei Anwendung von

kathodischem Schutz nicht geschützt und kann im schlimmsten Fall beschleunigt korrodieren [4]. Die Kosten der Installation von kathodischem Schutz werden durch das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der elektrisch durchleitenden Verbindung wesentlich beeinflusst.

#### Methode zur Ermittlung der zu schützenden Bereiche

Um die zu schützenden Bereiche auf das unbedingt nötige Maß einzugrenzen, wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Der Chloridgehalt darf nicht höher als 0,4 % (Zementmasse) betragen.
- Das elektrochemische Potential der Bewehrung darf nicht negativer als -200 mV gegen Cu/CuSO<sub>4, ges.</sub> sein.
- Der spezifische elektrolytische Betonwiderstand darf nicht niedriger als 70 kΩcm sein
- Es dürfen keine Frost/Tausalz-Schäden erkennbar sein.

Durch Übereinanderlegen der Messdaten der verschiedenen Untersuchungsmethoden (Abb. 4 – 7) wurden die zu schützenden Flächen auf ein Mindestmaß eingegrenzt.

Für die Deckenoberseite der Ebene 3 konnte, basierend auf den Messergebnissen, mit gutem Gewissen nur für einen Bruchteil der Fläche von kathodischem Schutz abgesehen werden (Abb. 8).

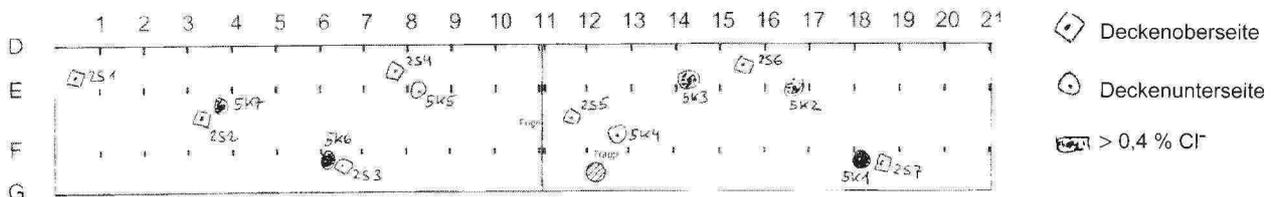


Abb. 4 Probeentnahmestellen zur Bestimmung des Chloridgehalts (dunkle Markierungen kennzeichnen Werte über 0,4 % pro Zementmasse).

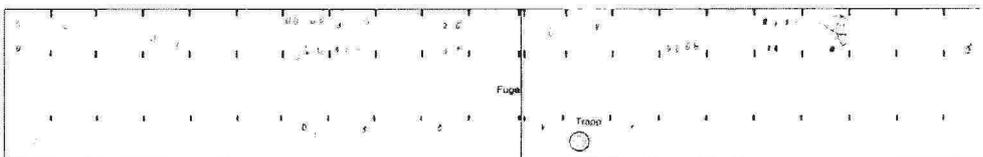


Abb. 5 Verteilung der Frost/Tausalz-Schäden des Betons der Deckenoberseite von Ebene 3.

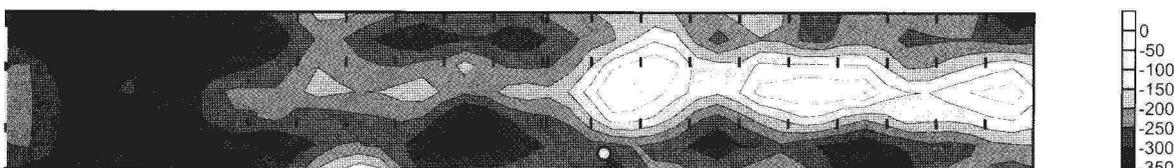


Abb. 6 Kontur-Diagramm der Verteilung des elektrochemischen Bewehrungspotentials (Deckenoberseite, Ebene 3) gemessen gegen Cu/CuSO<sub>4, ges.</sub> (7 × 21 = 147 Messpunkte)

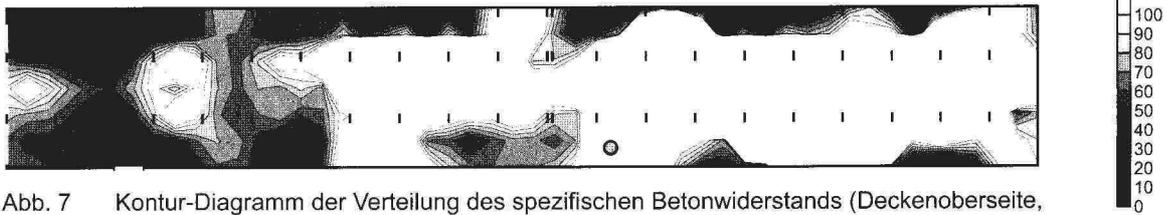


Abb. 7 Kontur-Diagramm der Verteilung des spezifischen Betonwiderstands (Deckenoberseite, Ebene 3) gemessen gegen Cu/CuSO<sub>4</sub>, ges. ( $7 \cdot 21 = 147$  Messpunkte)

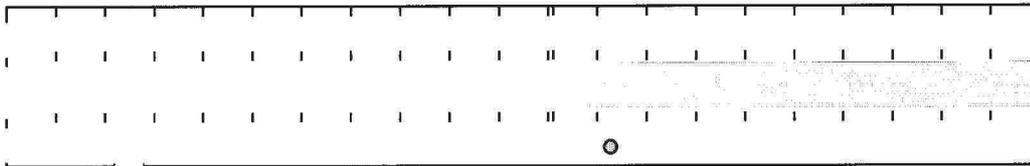


Abb. 8 Areal, wo kein Bedarf für kathodischen Schutz besteht.

### Karbonatisierung

Die Karbonatisierung wurde an Bohrkernen, entnommen von der Deckenoberseite von Ebene 2 und Ebene 3, bestimmt. Die minimale Tiefe wurde zu  $17 \pm 4$  mm und die maximale Tiefe zu  $21 \pm 3$  mm (Abb. 9). Nimmt man als die durchschnittliche Karbonatisierungstiefe 19 mm an, und setzt sie in Beziehung zur Verteilung der Betonüberdeckung, so sieht man, dass ca 5 % der Bewehrung in der Deckenoberseite in karbonatisiertem Beton liegen (Abb. 10).

Die elektrisch durchleitende Verbindung der Bewehrung war unzufriedenstellend, wie die Messresultate in Abb. 11 zeigen.

Von einer Installation des kathodischen Schutzes an der Unterseite wurde aufgrund der geringen Deckenstärke

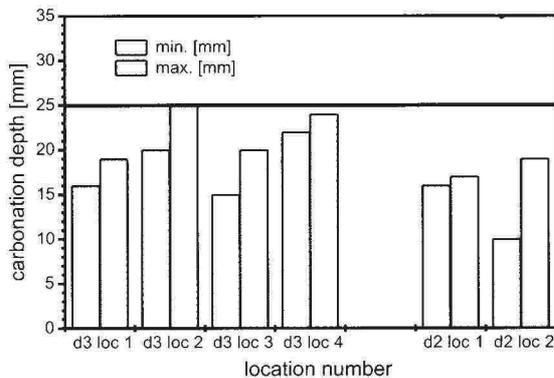


Abb. 9 Gemessene minimale und maximale Karbonatisierungstiefe in den beiden Deckenoberseiten

abgeraten. Es konnte auch davon ausgegangen werden, dass die unterseitige Bewehrung durch die Anode, angebracht auf der Deckenoberseite mitgeschützt wird. Ebenfalls wurde der Schutz der Säulen auf den unteren Bereich, 0,5 m vom Boden aufwärts, begrenzt. Die Chloridkonzentrationen in den Säulen waren oberhalb dieses Bereichs vernachlässigbar gering. Die Errichtung einer durchleitenden elektrischen Verbindung der Bewehrung war unumgänglich.

Diese Parameter gingen in die Kostenabschätzung zur Installation von kathodischem Schutz für dieses Bauwerk ein.

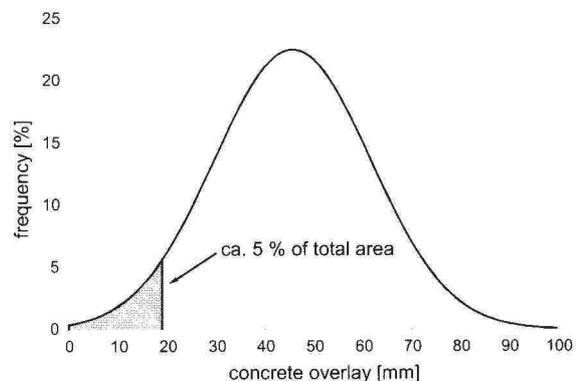


Abb. 10 Kombination der Verteilung der gemessenen Betonüberdeckung und der Messung der Karbonatisierungstiefe: 5 % der Bewehrung liegt in karbonatisiertem Beton

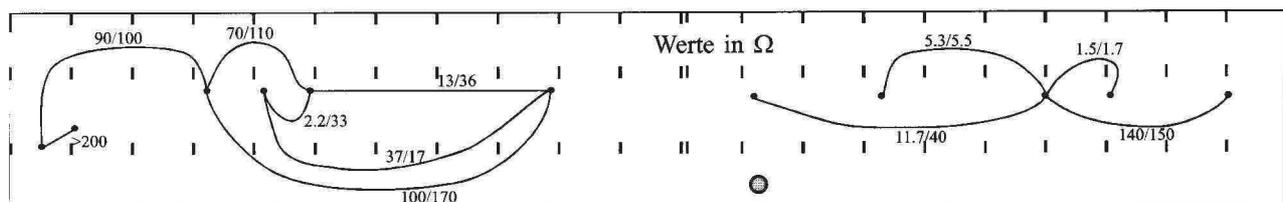


Abb. 11 Gemessene Gleichstrom-Widerstandswerte zwischen verschiedenen Punkten der freigelegten Bewehrung (Polarität wurde für jeden Messpunkt geändert).

## BESTELLUNG DER ARBEITEN

Im Juli 1999 erfolgte die Bestellung der Sanierungsarbeiten. Die Deckenober- und -unterseiten, Wände, Säulen und Fassaden sollten instandgesetzt werden. Kathodischer Korrosionsschutz sollte an sämtlichen Betondeckenoberseiten sowie an den unteren Bereichen der Säulen und der Wände installiert werden. Zusätzlich war die Asphaltdecke auszubessern, neue Fassadenelemente anzubringen und die elektrische Anlage der Garage zu reparieren.

Es bestand Übereinkunft, dass die sichtbaren Betonschäden aufzumeißeln und mit zementbasiertem Mörtel zu reparieren sind. Danach sollten an die Betondecken, Säulen und Wände eine Anode für den späteren kathodischen Schutz angebracht werden und die dazu nötige Elektronik installiert werden. Ein abriebfester Belag sollte auf die Deckenoberseite zur Verhinderung weiterer Chlorideindringung und Karbonatisierung aufgebracht werden. Die Dehnungsfugen in den Decken waren auch auszubessern. Letztendlich waren die Säulen, Wände und Deckenunterseite mit einer CO<sub>2</sub>-Bremsse zu beschichten.

## INSTANDSETZUNG UND INSTALLATION VON KATHODISCHEM KORROSIONSSCHUTZ

Im Folgenden wird der Fortgang der Instandsetzung mit einigen Bildern dokumentiert. Durch Aufmeißeln der Betondecke wurde der Bedarf für den Schutz der korrodierenden Bewehrung eindrucksvoll bestätigt (Abb. 12).

Die durchleitende elektrische Verbindung der Bewehrung wurde durch Schweißverbindungen hergestellt (Abb. 13).

Die Referenzelektroden zur Überwachung des kathodischen Schutzes wurden an den "anodischsten Stellen" eingebettet: In Bereichen, welche in der Bauwerksuntersuchung als korrosiv eingestuft wurden, wurde ein Bewehrungsstab ausgewählt und mit einer tragbaren Cu/CuSO<sub>4</sub>-Referenzelektrode entlang dieses Stabes das Potential abgetastet. Bei der Stelle mit dem negativsten Wert wurde ein Sensor seitlich in gleicher Tiefe der Bewehrung einge-

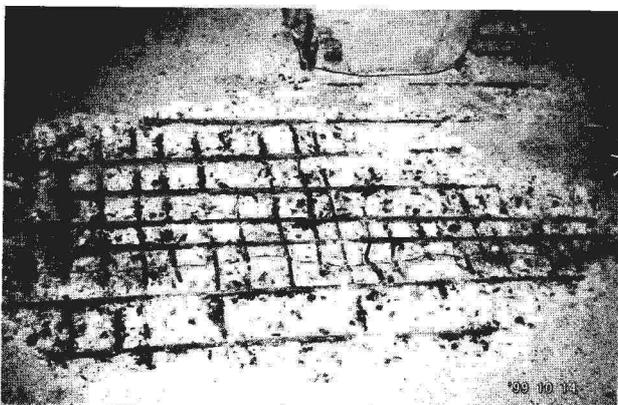


Abb. 12 Korrosionsschäden, die aufgemeißelt und für die Instandsetzung vorbereitet wurden.

bettet (Abb. 14). Pro Betondecke (1770 m<sup>2</sup>) wurden 8 Referenzelektroden eingebettet, dazu ein Temperatursensor und in eine der Betondecken ein Widerstandssensor. Einige Referenzelektroden wurden in den Säulen eingebettet. Die Platzierung der Sensoren für Ebene 3 ist in Abb. 15 ersichtlich.

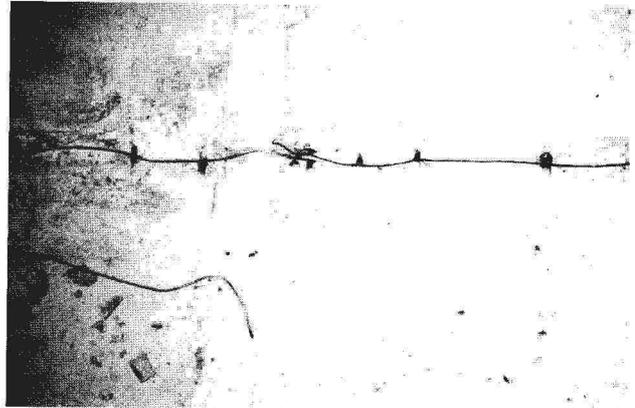


Abb. 13 Errichtung der elektrisch durchleitenden Verbindung der Bewehrung.

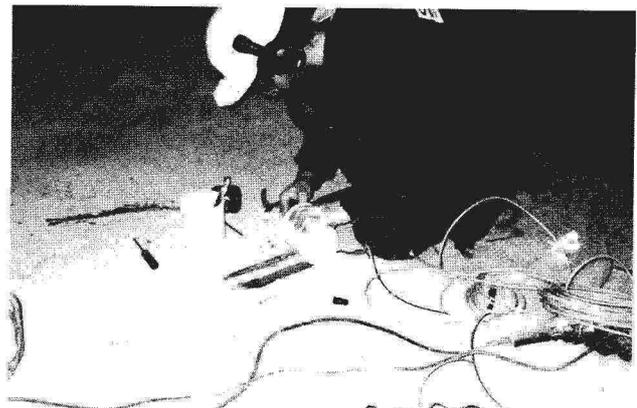


Abb. 14 Installation der Überwachungssensoren in die Betondecke

Vor dem Aufbringen der Anode wurden die Betonflächen durch Kugelstrahlen gereinigt, danach das Primäranoden-Netzwerk gemäß Design (Abb. 16) installiert und letztlich die Sekundäranode in Streifenform auf den Beton aufgebracht. Die Sekundäranode wurde auf den Betondecken mit dem abriebfesten Belag beschichtet, an den Wänden und Säulen mit einer elastischen Membran, welche zugleich als CO<sub>2</sub>-Bremsse fungiert (Abb. 17).

Der Überwachungsschrank der Anlage beinhaltet im Wesentlichen Gleichstromquellen für den kathodischen Schutz, Datenlogger zum kontinuierlichen Aufzeichnen der Messdaten mithilfe der eingebetteten Sensoren und Modems für die Fernabfrage der Daten und zur Fernjustierung des Schutzsystems (Abb. 18).

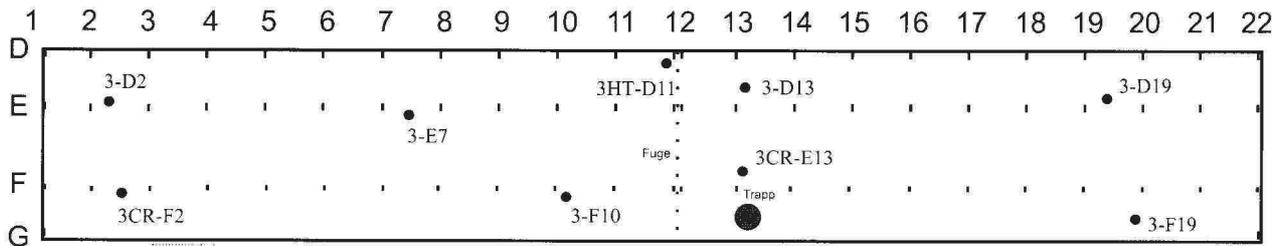


Abb. 15 Platzierung der Überwachungssensoren in Ebene 3 der Parkgarage.

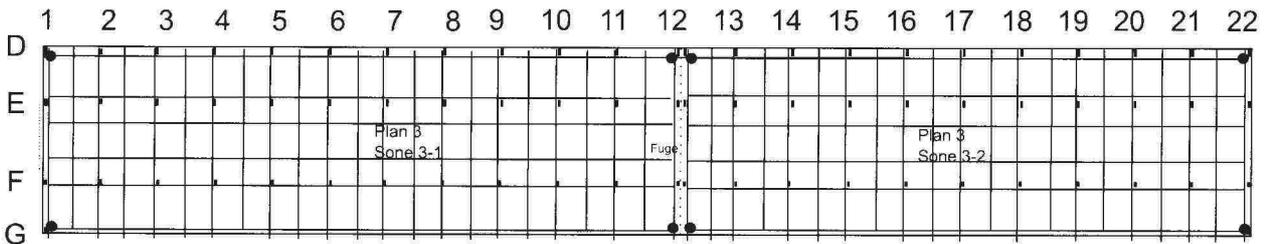


Abb. 16 Layout für die Primäranoden für die Schutzzonen in Ebene 3.

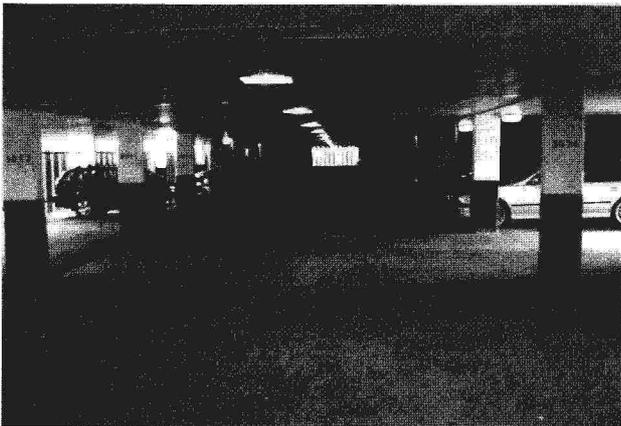


Abb. 17 Abriebbeständiger Belag, aufgebracht auf die Anode (Foto 4 Jahre nach Fertigstellung aufgenommen).

### ÜBERWACHUNG DER KORROSIONSSCHUTZANLAGE

Die Korrosionsschutzanlage wurde kontinuierlich seit der Übergabe überwacht. Die Aufzeichnungen begannen mit 23. 3. 2000. Der Schutzstrom wurde am 12. 4. 2000 eingeschaltet. Vor dem Einschalten des Schutzstroms wurden elektrochemische Messungen zur Charakterisierung des Bewehrungszustands durchgeführt. Spätere Messungen sind auf diese bezogen. Die Aufzeichnung der kontinuierlichen Messdaten (Temperatur, Schutzstromdichte, Schutzspannung, Bewehrungspotential, Betonwiderstand) erfolgte im 1-Stunden Intervall. 15 Depolarisierungsmessungen wurden seit dem Einschalten des Schutzstroms durchgeführt. Die Auswertung und Interpretation der erhaltenen Daten wird in den folgenden Absätzen diskutiert.

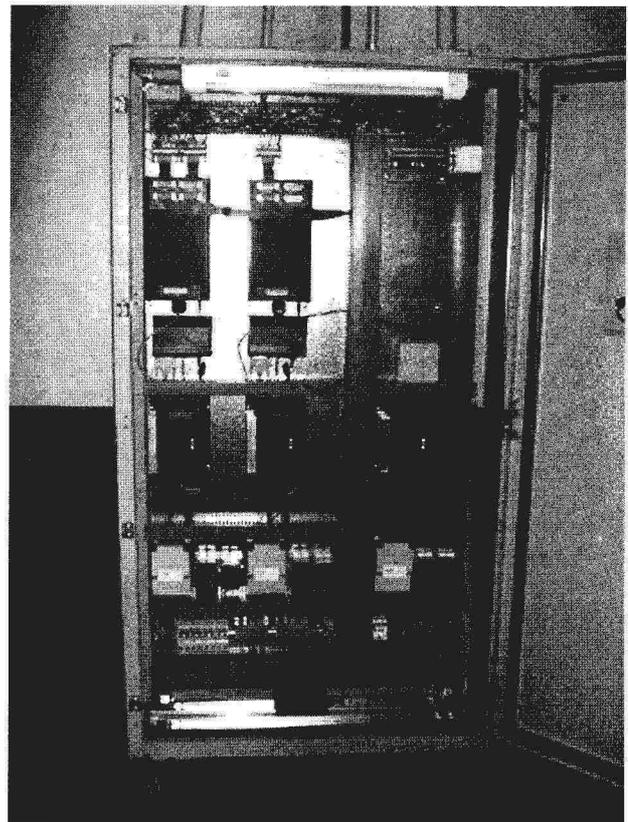


Abb. 18 Überwachungsschrank für die Korrosionsschutzanlage

### Jahreskurven

Jahreskurven beinhalten alle gemessenen Parameter über ein gesamtes Kalenderjahr. Die Darstellung der Messwerte in Jahreskurven erlaubt eine sofortige Bewertung, ob die Messwerte in sich konsistent sind. So ist es möglich festzustellen, ob ein eventuell merkwürdiges Signalverhalten eines Messsensors auf jahreszeitliche Schwankungen oder eine Instabilität des Sensors zurückzuführen ist.

Ein Beispiel für eine Jahreskurve zeigt Abb. 19. Es ist ersichtlich, dass die Schwankungen der elektrochemischen Parameter hauptsächlich durch die Betontemperatur verursacht werden.

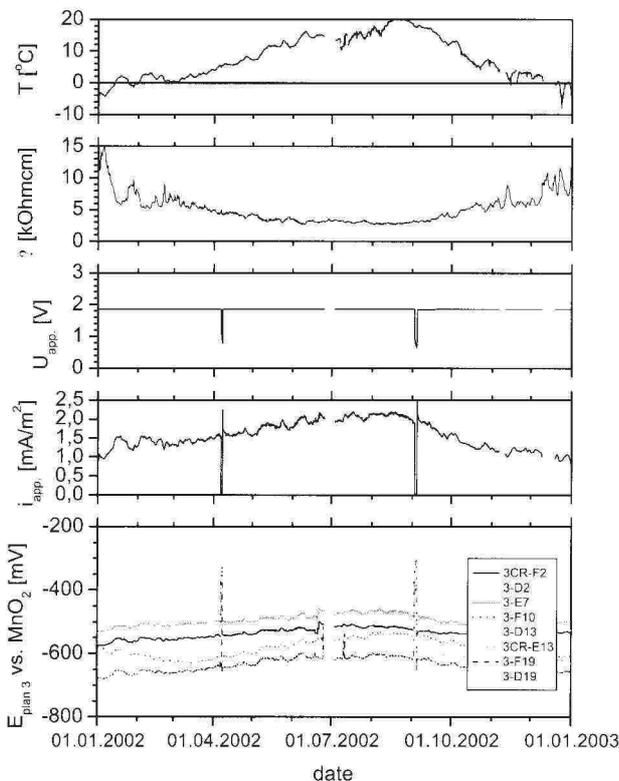


Abb. 19 Zusammenstellung der Messwerte der Ebene 3 über ein Jahr (von oben nach unten: Temperatur, Betonwiderstand, Schutzspannung, Schutzstromdichte, Bewehrungspotentiale)

Aus Abb. 19 ist ersichtlich, dass der Schutzstrom zweimal unterbrochen wurde. Die Unterbrechung des Stroms bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Potentialwerte heißt Depolarisations- oder Decaymessung.

### Depolarisationsmessung

Depolarisationsmessungen sind die wichtigsten Messungen überhaupt und geben Auskunft ob eine kathodische Korrosionsschutzanlage zufriedenstellend funktioniert oder

nicht. Bei der Depolarisationsmessung wird die (iR-freie) Polarisierung der Bewehrung zurzeit der Stromunterbrechung bestimmt. Als Polarisierung versteht man die Differenz zwischen Ausschaltpotential der Bewehrung und dem statischen Bewehrungspotential zu einer bestimmten Zeit nach Ausschalten des Stroms (für gewöhnlich nach 24 Stunden). Die Messergebnisse verwendet man, um die Schutzstromdichte für die betreffende Schutzzone zu optimieren.

Die Methode der Depolarisationsmessung ist in verschiedenen internationalen Richtlinien beschrieben [5, 6]. Ein Beispiel für den Verlauf einer Depolarisierung ist in Abb. 20 gezeigt.

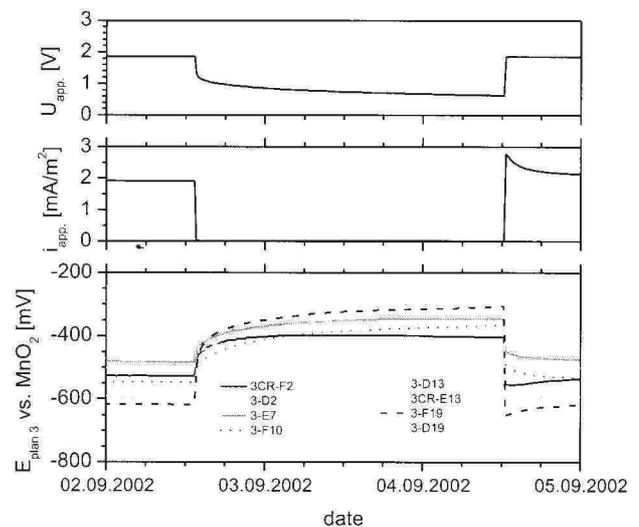


Abb. 20 Typische Depolarisationsmessung, durchgeführt für die Schutzzone der Ebene 3. Die Depolarisierung der Bewehrung wird mit den eingebauten  $MnO_2$ -Referenzelektroden gemessen (unterstes Diagramm)

Wenn ein 24-Stunden-Depolarisierungswert von weniger als 100 mV mit einer oder mehreren Referenzelektroden gemessen wird, soll die Schutzstromdichte (Schutzspannung) erhöht werden. Liegen alle Depolarisationswerte weit höher als 100 mV, kann die Schutzstromdichte (Schutzspannung) verringert werden. Die Depolarisationswerte, extrahiert aus den Messkurven von Abb. 20, sind in Abb. 21 für die einzelnen Messstellen dargestellt.

Zur Interpretation der Depolarisationswerte und zu deren Verwendung als Justierungsparameter muss die einwandfreie Funktion des jeweiligen Messsensors gewährleistet sein.

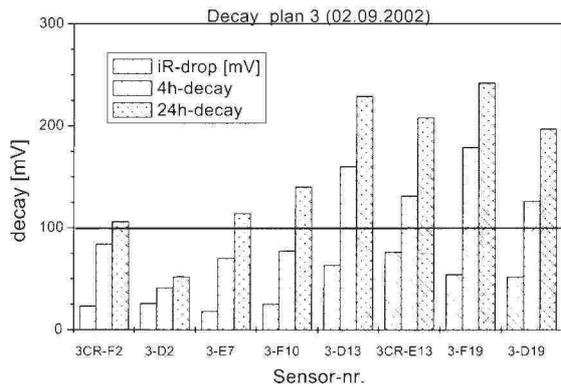


Abb. 21 Depolarisationswerte für die Schutzzone Ebene 3 gemessen nach 4 Stunden bzw. nach 24 Stunden:  $U_{prot.} = 1.85 \text{ V}$ ,  $i_{prot.} = 1.90 \text{ mA/m}^2$  (Betonoberfläche) Die eingezeichnete Linie markiert das 100 mV-Kriterium. Im vorliegenden Fall könnte eine Erhöhung der Schutzstromdichte (der Schutzspannung) erwogen werden.

### Entwicklung des Korrosionszustandes der Bewehrung

Aus der Literatur ist bekannt, dass sich der elektrochemische Zustand der Bewehrung durch Anwenden von kathodischem Korrosionsschutz nachhaltig ändert. Schaltet man den Schutzstrom nach einer längeren Strom-Ein-Periode (z.B. 1 Jahr) wieder ab, so ist oft zumindest teilweise Passivierung eingetreten, welche über einen längere Zeit aufrechterhalten bleibt. Dies drückt sich in der Verschiebung des Bewehrungspotentials [7, 8] in anodische Richtung (bei Strom-Aus) und höheren Depolarisationswerten [9, 10] aus. Verantwortlich für die Änderung des elektrochemischen Zustands der Bewehrung ist die über die Zeit absorbierte elektrische Ladungsmenge [9]. Die absorbierte Ladungsmenge für die Schutzzone Ebene 3 betrug nach vier Jahren kathodischen Schutzes  $215 \text{ kC/m}^2$  ( $58 \text{ Ah/m}^2$ , Abb. 22). Das entspricht der Ladungsmenge von Chloridionen, die in 130 g Natriumchlorid enthalten sind.

Obwohl bei der kathodischen Polarisierung nur ein Teil der Ladungsmenge zum "Chloridentzug" verwendet wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Chloridgehalt in der Umgebung der Bewehrung stark reduziert wurde.

Gleichzeitig wurde der Gehalt an Hydroxylionen (Alkalität) in Bewehrungsnähe durch die kathodische Reaktion ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ) über die Zeit erhöht, was sich ebenfalls günstig auf den elektrochemischen Zustand der Bewehrung auswirkte. Abb. 24 zeigt auch die Betontemperatur zu den Zeitpunkten der Depolarisationsmessungen sowie den Betonwiderstand zwischen Anode und Bewehrung. Der Betonwiderstand wurde durch Ausschaltmessung bestimmt, wobei, der iR-Abfall zwischen Anode und Bewehrung als Spannungswert und die Schutzstromdichte als Stromwert in das Ohmsche Gesetz ( $U = R \times I$ ) eingesetzt

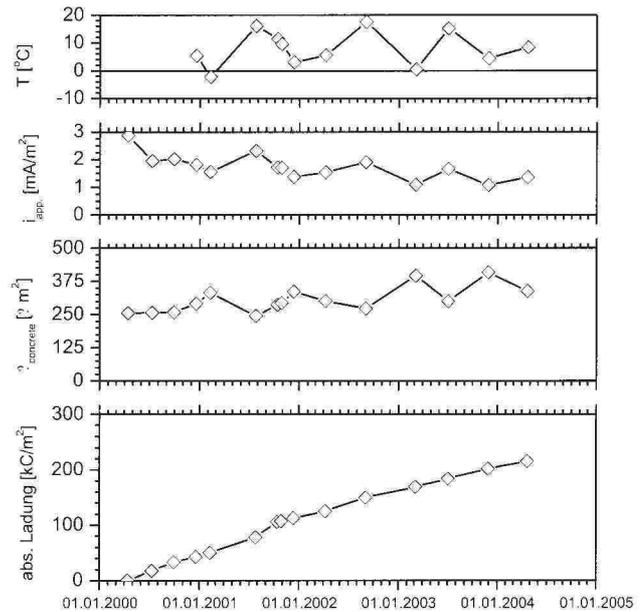


Abb. 22 Entwicklung der Temperatur, der Schutzstromdichte, des Betonwiderstands (auf Anodenfläche bezogen) und der gesamten absorbierten Ladungsmenge für die Schutzzone Ebene 3. Die Messwerte sind für die Zeitpunkte der Depolarisationsmessungen angegeben.

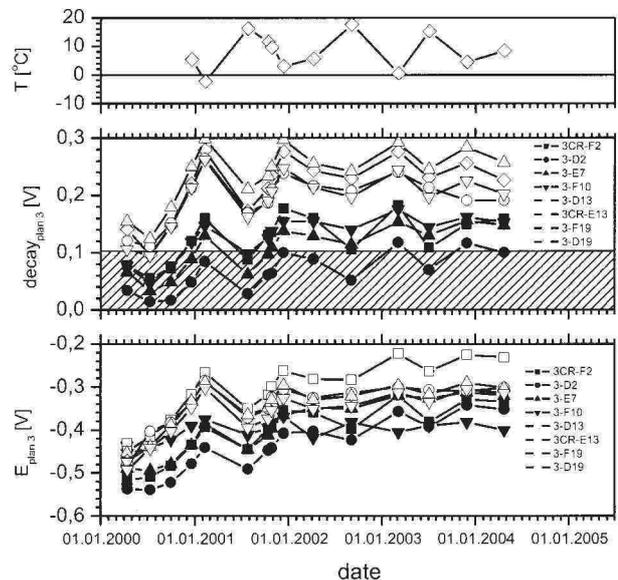


Abb. 23 Entwicklung der Depolarisationswerte und des Bewehrungspotentials, gemessen mit den eingebetteten Referenzelektroden, über die Dauer des kathodischen Korrosionsschutzes.

wurde. Zusätzlich zu den jahreszeitlichen Schwankungen ist tendenziell ein leichter Anstieg dieses Widerstandswertes ersichtlich, möglicherweise durch Ionenverarmung in Anodennähe.

Abb. 23 zeigt die Entwicklung der Depolarisierung und des statischen Bewehrungspotentials über die Dauer des kathodischen Schutzes. Zu Beginn war die Polarisierung der Bewehrung äußerst niedrig und das statische Bewehrungspotential sehr negativ. Mit einigen Spannungsjustierungen im ersten Jahr und dem offensichtlich passivierenden Effekt mit der Dauer des kathodischen Schutzes erhöhten sich die Depolarisationswerte beträchtlich (von im Schnitt 97 mV bei der ersten Depolarisation auf im Schnitt 179 mV bei der letzten Depolarisation). Gleichzeitig änderte sich das statische Bewehrungspotential von im Schnitt -472 mV vs. MnO<sub>2</sub> vor Anlegen des Schutzstroms auf nur mehr -320 mV vs. MnO<sub>2</sub> nach vier Jahren kathodischem Schutz.

Die Resultate von den Depolarisationsmessungen (Depolarisierungswerte und statische Bewehrungspotentiale) können bei aller gebotenen Vorsicht folgendermaßen interpretiert werden:

Die Depolarisationsmessung kann als lineare Polarisationswiderstandsmessung (LPR) aufgefasst werden, wobei man den Wert der Depolarisierung (decay) und den Wert der Schutzstromdichte ( $i_{prot}$ ) in die Stern-Geary-Gleichung einsetzt. Zur Bestimmung des Polarisationswiderstands  $R_p$  nimmt man dafür am besten den Durchschnitt aller Werte einer Messung für eine Schutzzone (Gl. 1)

$$R_p = \frac{decay_{avg.}}{i_{prot}} \quad \text{Gl. 1}$$

Die durchschnittliche Korrosionsstromdichte  $i_{corr}$  für diese Schutzzone kann dann berechnet werden nach:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Gl. 2}$$

mit B als Wert für die Stern-Geary-Konstante (für gewöhnlich 26 mV)

Führt man nun eine Depolarisationsmessung zu einem sehr frühen Zeitpunkt nach Einschalten des Schutzstroms durch (z.B. nach einem Tag), so kann man die so erhaltene Korrosionsstromdichte gleich 100 % setzen (die Korrosionsrate vor Anlegen des Schutzes ist also 100 %) und die Werte von den Depolarisationsmessungen, die zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt wurden, auf diesen Ausgangswert beziehen.

Die relative Korrosionsrate zu einem späteren Depolarisierungszeitpunkt ( $t_n$ ), bezogen auf die ursprüngliche Korrosionsrate vor Anlegen des Schutzes (Zeitpunkt  $t_0$ ), errechnet sich demnach zu:

$$i_{corr,rel.}[\%] = \frac{i_{corr}(t_n)}{i_{corr}(t_0)} \cdot 100 = \frac{i_{prot}(t_n) \cdot decay_{avg.}(t_0)}{i_{prot}(t_0) \cdot decay_{avg.}(t_n)} \cdot 100 \quad \text{Gl.3}$$

Bei Auftragen der relativen Korrosionsrate gegen die Dauer des kathodischen Korrosionsschutzes wird ersichtlich, ob und in welchem Ausmaß sich der elektrochemische Zustand der Bewehrung - bei ausgeschaltetem Schutzstrom - geändert hat.

In Abb. 24 wird die Entwicklung des elektrochemischen Zustands der Bewehrung gezeigt. Der Kurvenverlauf deutet eine beträchtliche Reduktion der freien Korrosionsrate an, die aller Wahrscheinlichkeit nach durch Entzug der Chloridionen in Bewehrungsumgebung und durch Erhöhung der Alkalität an der Bewehrungsoberfläche aufgrund der kathodischen Reaktion verursacht wurde.

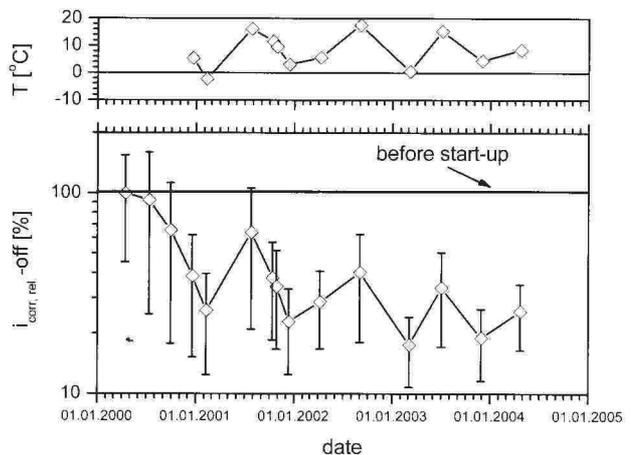


Abb. 24 Entwicklung der durchschnittlichen relativen Korrosionsrate für die Bewehrung in Ebene 3 für den stromfreien Zustand mit der Dauer des kathodischen Schutzes nach Gl. 3.

Mithilfe der Depolarisationsmessungen lässt sich eine Aussage über den Schutzgrad kurz vor einer Depolarisationsmessung treffen, wenn man die Werte der Depolarisationsmessung in Beziehung setzt zu den Tafelkonstanten, erhalten von einer E-log I-Messung (Tafelmessung), die vor Anlegen des kathodischen Schutzes durchgeführt wurde.

Bei einer E-log I-Messung wird normalerweise der Mindestschutzstrom bestimmt, der nötig ist um die Bewehrung gegen Korrosion zu schützen. Bei diesem Test erhöht man stufenweise den kathodischen Schutzstrom und misst das Bewehrungspotential am Ende einer jeden Stufe. Die Auftragung des Bewehrungspotentials gegen den Logarithmus des Schutzstroms nennt man E-log I-Plot. Der Strom, nötig für ausreichenden Schutz, ist bestimmt durch den Beginn des linearen Verhaltens in der halblogarithmischen Auftragung [5].

In der Literatur finden sich leider keine generellen Richtlinien zur Durchführung eines derartigen Tests. In Referenz [7] werden folgende Parameter für den E-log I Test verwendet:

- Erhöhung des Stroms in geringen Stufen, welche anfangs das Bewehrungspotential jeweils um 2 mV verschieben und in den späteren Stufen um 5 mV.
- Einschwingzeit zwischen den Stufen von ca. 3 min.

In dieser Arbeit wurde bei der E-log I-Messung der Strom in Inkrementen von ca. 0,5 A für 1000 m<sup>2</sup> Areal erhöht. Nach einer Einschwingzeit von 1 min wurde das Potential iR-frei gemessen (Ausschaltpotential). Abb. 25 zeigt ein Beispiel für die Durchführung einer E-log I-Messung. Die Technik der E-log I-Messung wurde hier zur Bestimmung der anodischen Tafelkonstanten verwendet. Die Größe dieser Konstanten gibt an, um welchen Betrag die Bewehrung kathodisch polarisiert werden muss, um die Korrosionsrate um eine Zehnerpotenz zu verringern.

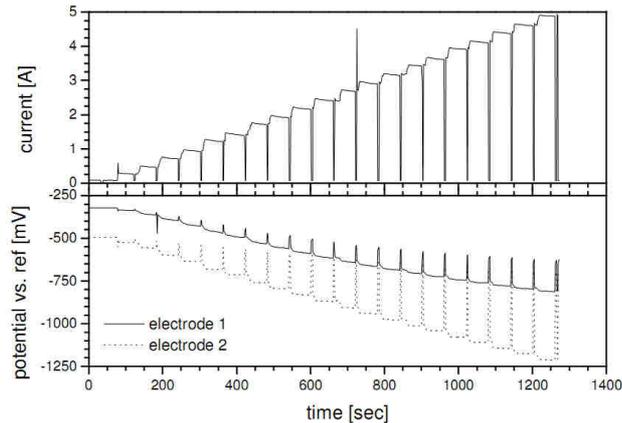


Abb. 25 Durchführung einer E-log I Messung durch stufenweise Erhöhung des Stroms und Messung des iR-freien Potentials am Ende der Einschwingzeit.

Die Beziehung zwischen angelegtem Strom und iR-freiem Bewehrungspotential wurde durch die Butler-Volmer Gleichung angepasst:

$$I_{app.} = I^+ + I^- = I_{corr} \cdot \left[ 10^{\frac{E-E_{corr}}{b_a}} - 10^{-\frac{E-E_{corr}}{b_c}} \right] \quad \text{Gl. 4}$$

- mit:
- $I_{app.}$  ..... angelegter Strom
  - $I^+$  ..... partieller anodischer Strom
  - $I^-$  ..... partieller kathodischer Strom
  - $I_{corr}$  ..... Korrosionsstrom
  - $E_{corr}$  ..... Korrosionspotential
  - $E$  ..... angelegtes Potential
  - $b_a$  ..... anodische Tafelkonstante
  - $b_c$  ..... kathodische Tafelkonstante

Ein Beispiel der Kurvenanpassung ist in Abb. 26 gezeigt. Der Kurvenverlauf mit den offenen Rauten zeigt den Strom als Funktion des Bewehrungspotentials. Die durchgezogene Linie entspricht der Kurvenanpassung gemäß Gl. 4. Die strichpunktierte Linie entspricht der Abhängigkeit des partiellen kathodischen Stroms vom Potential (Gl. 5), die gestrichelte Linie der Abhängigkeit des partiellen anodischen

Stroms vom Potential (Gl. 6). Die Summe der partiellen Ströme wird in der Butler-Volmer Gleichung (Gl. 4) wiedergegeben.

$$I^- = -I_{corr} \cdot 10^{-\frac{E-E_{corr}}{b_c}} \quad \text{Gl. 5}$$

$$I^+ = I_{corr} \cdot 10^{\frac{E-E_{corr}}{b_a}} \quad \text{Gl. 6}$$

Den Kurvenverlauf mit den vollen Rauten erhält man, wenn die Messwerte (offenen Rauten) vom partiellen kathodischen Kurvenverlauf (Gl. 5) der angepassten Kurve (Gl. 4) abgezogen werden. Augenscheinlich passen diese Restwerte zum partiellen anodischen Kurvenverlauf (Gl. 6).

Gemäß der Theorie der E-log I Messung entspricht der Punkt, wo die kathodische Polarisationskurve im halb-logarithmischen Auftrag linear wird, dem Mindeststrom für hinreichenden kathodischen Schutz. Dieser Punkt kann als der Punkt betrachtet werden, wo die anodische Teilreaktion (Eisenauflösung) vernachlässigbar wird. "Vernachlässigbarkeit" oder hinreichender Schutz ist erreicht, wenn die Korrosionsrate um mindestens 90 % verringert wird [12]. In Abb. 26 beginnt die Linearität ungefähr bei Polarisierung um den Betrag der anodischen Tafelkonstanten. Polarisierung um diesen Betrag wird als zufriedenstellend angesehen [13].

Die Methode der E-log I-Messung wird heutzutage nicht mehr als Kriterium für hinreichenden kathodischen Schutz verwendet. Dieses Kriterium wurde auch nicht in die Europäische Norm EN 12696 aufgenommen. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Methode schwierig in der Anwendung und in der Interpretation ist. Auch hat der Mangel an Korrosionsdaten für Stahl in Beton zu Unsicherheiten bezüglich der Wirksamkeit dieser Methode geführt [14].

In dieser Arbeit wurde die E-log I Methode nur als elektrochemisches Werkzeug verwendet, um die Langzeitwirkung von kathodischem Schutz auf den elektrochemischen Zustand der Bewehrung qualitativ zu charakterisieren:

Um den durchschnittlichen Schutzgrad der Bewehrung zu bestimmen, bezieht man die Werte der aufeinanderfolgenden Depolarisationsmessungen auf die Werte der vor Anlegen des Schutzstroms bestimmten Tafelkonstanten und bildet den Durchschnitt. Wird bei der Depolarisierung der Wert einer Tafelkonstante erreicht, so liegt die Korrosionsrate bei 10 % des Ausgangswerts, beim Wert von zwei Tafelkonstanten nur mehr bei 1 %. In Abb. 27 wird der Verlauf der Korrosionsrate bei eingeschaltetem Schutzstrom gezeigt. Anfänglich konnte die Korrosionsrate nur auf 10 % verringert werden, nach einigen Monaten jedoch um ca. zwei Größenordnungen auf 1 %.

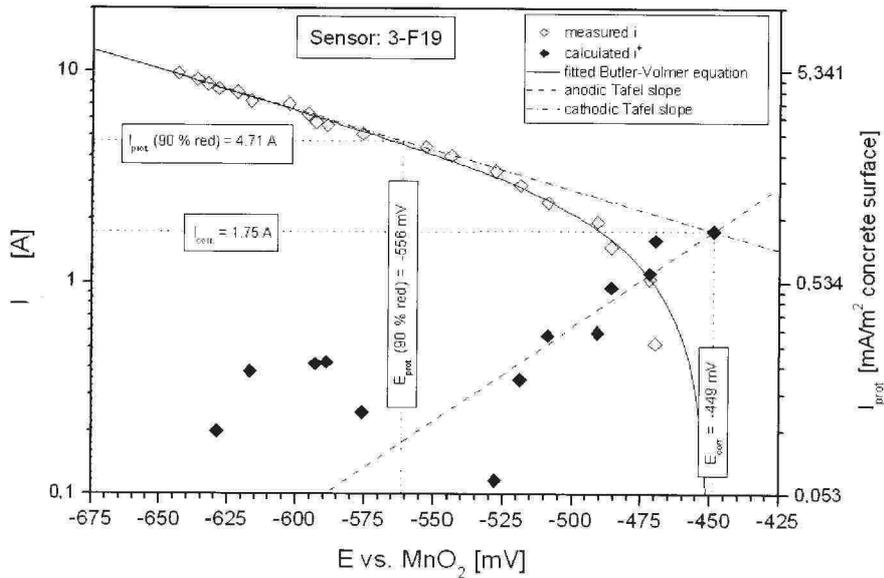


Abb. 26 Beispiel für die Auswertung einer E-log I Messung.

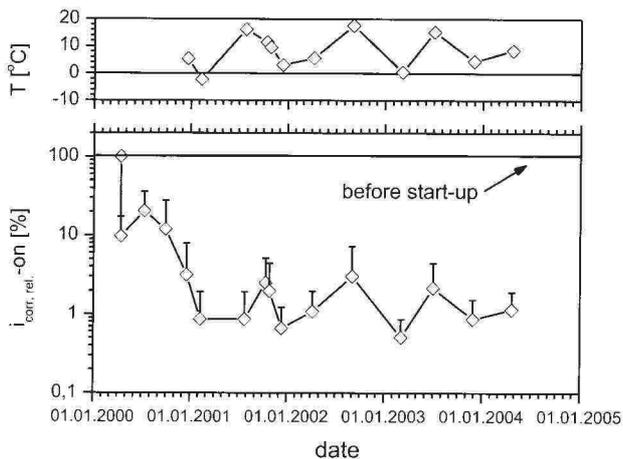


Abb. 27 Verlauf der durchschnittlichen relativen Korrosionsrate für die Bewehrung in Ebene 3 bei eingeschaltetem Strom mit der Dauer des kathodischen Schutzes

## ZUSAMMENFASSUNG

### Zustandserfassung

Bei einer geplanten Anwendung von kathodischem Schutz als Sanierungsmethode einer korrosionsgefährdeten/korrosionsgeschädigten Parkgarage ist eine gründliche Zustandserfassung nötig, um den tatsächlichen quantitativen Bedarf (die Areale) für diese Methode zu begrenzen. Das erlaubt ein kostenoptimiertes Design von kathodischem Schutz, speziell für die Bereiche der Parkgarage, bei denen kathodischer Schutz wirklich nötig ist.

Die Zustandserfassung des Betonbauwerks mit möglicherweise korrodierender Bewehrung sollte gründlich durchgeführt werden. Eine Messmethode allein ist oft nicht genug um einen wirklichen Eindruck über die Korrosionsproblematik zu erhalten.

### Installation von kathodischem Korrosionsschutz

Die Qualität der Ausführung der Installation von kathodischem Korrosionsschutz bedeutet sehr viel für eine optimal funktionierende Anlage. Dazu gehören die oftmals nötigen konventionellen Betoninstandsetzungsarbeiten, die Errichtung der durchleitenden elektrischen Verbindung der Bewehrung, eine den vorherrschenden Bedingungen entsprechend taugliche Anode und Anodenüberdeckung samt sorgfältig durchgeführter Anbringung. Es gehört auch die einwandfreie Installation von verlässlichen Referenzelektroden dazu, und letztendlich die Installation der Überwachungsanlage mit verlässlich funktionierenden elektronischen Komponenten.

### Überwachung

Es wird empfohlen sämtliche Überwachungsparameter über einen bestimmten Zeitraum (z.B. über 1 Jahr) gleichzeitig in einem Diagramm abzubilden. Dadurch ist es leichter möglich zwischen veränderlichen Parametern (angelegter Strom/Spannung, Temperatur etc.) und den Effekten an der Bewehrung (im Wesentlichen Änderungen des Bewehrungspotentials) Zusammenhänge zu sehen.

Für eine einwandfreie Überwachung muss man den Messwerten, speziell denen der Referenzelektroden, vertrauen können.

### Depolarisationsmessungen

Depolarisationsmessungen gehören zu den wichtigsten Kontrollmessungen überhaupt. Zu Beginn der Schutzperiode sind die Depolarisationswerte für die ursprünglich korrodierende Bewehrung niedriger als zu einem späteren Zeitpunkt der Schutzperiode bei vergleichbarer angelegter Schutzspannung (Schutzstrom). Das lässt sich mit über die Dauer des kathodischen Schutzes teilweiser Passivierung der korrodierenden Bewehrung erklären. Die Kombination der Depolarisationsmessungen und der angelegten Schutzstromdichte ermöglicht eine Aussage über die relative Änderung des elektrochemischen Bewehrungszustands ("Gesundheitszustand der Bewehrung"). Bei Zuhilfenahme von zusätzlichen E-log I-Messungen, durchgeführt vor dem erstmaligen Einschalten des Schutzstroms, lässt sich bei aller gebotenen Vorsicht auch eine Aussage über den Schutzgrad zurzeit der Depolarisationsmessung treffen. Ausdrücklich sei wiederum darauf hingewiesen, dass die Messwerte, erhalten von den Referenzelektroden, zuverlässig sein müssen.

### Literatur

- [1] ASTM C 876-87; Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete; ASTM, West Conshohocken, Pa., 1987
- [2] G.K. Glass, N.R. Buenfeld; The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete; *Corrosion Science*, 39, 1001-1013 (1997)
- [3] M.W. Gewertz, B. Tremper, J.L. Beaton, R. Stratful; Causes and Repair Deterioration to a Californian Bridge due to Corrosion of Reinforcing Steel in a Marine Environment; *Highway Research Bulletin*, 182 (1958) 41
- [4] E. Proverbio, E. Mejía, O. García, E. Traversa; Incorrect Cathodic Protection Connection Leads to Rebar Corrosion; *Materials Performance*, 34/8, 27-30 (1995)
- [5] NACE Standard RP090-90; Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures; NACE, Houston, TX, 1990
- [6] European Standard EN 12696; Cathodic protection of steel in concrete; European Committee for Standardisation, rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels, March 2000
- [7] W.F. Perenchio, J.R. Landgren, R.E. West, K.C. Clear; National Cooperative Highway Research Program 278, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1985
- [8] J.P. Broomfield; Field Survey of Cathodic Protection on North American Bridges; *Materials Performance*, 31/9, 28-33 (1992)
- [9] L. Bertolini, F. Bolzoni, P. Pedferri, T. Pastore; Cathodic Protection of Reinforcement in Carbonated Concrete; *Corrosion98*, Paper 639, NACE, Houston, TX, 1998
- [10] M.G. Ali, Rasheeduzzafar; Polarized Period, Current Density, and Cathodic Protection Criteria; *ACI Materials Journal*, 89, 247-251 (1992)
- [11] J.E. Bennett, J.J. Bartholomew, J.B. Bushman, K.C. Clear, R.N. Kamp, W.J. Swiat; Cathodic Protection of Concrete Bridges: A Manual of Practice; SHRP-S-372, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1993, p. 123
- [12] J. Broomfield; The pros and cons of corrosion inhibitors; *Construction Repair*, 11/4, 16-18 (1997)
- [13] J.E. Bennett and T.A. Mitchell; Depolarization Testing of Cathodically Protected Reinforcing Steel in Concrete; *Materials Performance*, 29/12, 20-25 (1990)
- [14] J. Bennett, J.P. Broomfield; Analysis of Studies on Cathodic Protection Criteria for Steel in Concrete; *Materials Performance*, 36/12, 16-21 (1997)