

Langzeitüberwachung von KKS - Möglichkeiten bei der Auswertung von Depolarisationsmessungen

Franz Pruckner
Korupp GmbH
www.korupp-kks.de
franz.pruckner@korupp-kks.de

Schlüsselwörter: Bewehrungskorrosion, Kathodischer Korrosionsschutz, Depolarisierung, Überwachung.

Einleitung

Depolarisierungsmessungen sind im kathodischen Korrosionsschutz ein Standardverfahren für die Beurteilung, ob der Schutz hinreichend ist. Das generell akzeptierte und durch Normen definierte Verfahren ist das 100-mV Kriterium. Hierbei wird als Depolarisierung die Potentialdifferenz zwischen dem Ausschaltpotential (iR-freies Schutzpotential) und dem Potential 24 Stunden nach dem Ausschalten verwendet.

Das iR-freie Ausschaltpotential wird in der ersten Sekunde ermittelt (0.1 – 1 sec). In der Regel ist der Meßunterschied innerhalb dieses Intervalls sehr klein [1] (siehe Fig. 1). Als Kriterium für hinreichenden Schutz wird ein Potentialanstieg von 100 mV, gemessen vom iR-freien Schutzpotential innerhalb von 24 Stunden angesehen [2, 3] (siehe auch Fig. 2).

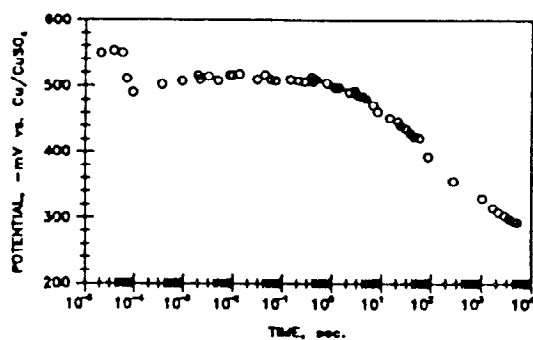


Fig. 1.: Depolarisierung der Bewehrung. Plateau im Meßbereich der ersten Sekunde (von Referenz [1]).

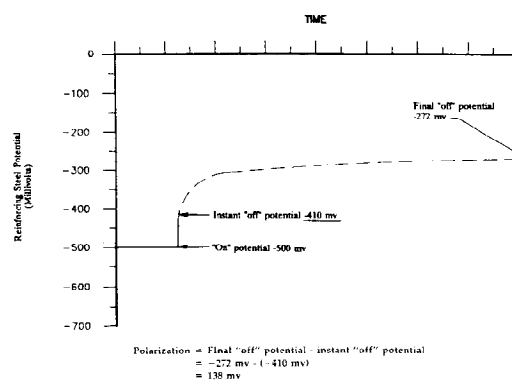


Fig. 2.: Bestimmung der Depolarisierung von Bewehrungsstahl in Beton (von Referenz [2]).

Das 100-mV Kriterium ist aus rein pragmatischen Überlegungen entstanden: Es ist einfach anzuwenden und funktioniert gut. Bereits 1951 wurde von S.P. Ewing herausgefunden, daß ein Wert von weniger als 100 mV für die Polarisierung von Rohrleitungen genügt, um sie zu schützen. Das dürfte der Ursprung des 100-mV (De-)Polarisierungskriteriums sein [4]. Das Kriterium ist rein empirisch und seine Brauchbarkeit wurde in zahlreichen Untersuchungen bestätigt [5-7]. Erst viel später wurde versucht, das Kriterium, basierend auf den zahlreichen Untersuchungen, auf ein theoretisches Fundament zu stellen [8, 9].

In der Praxis ist es sehr viel einfacher, die Depolarisierung eines polarisierten Objektes zu messen, als die Polarisierung eines unpolarisierten Objektes. Deswegen wird das Kriterium als Depolarisierungskriterium bezeichnet. In jedem Fall ist jedoch die Polarisierung des Objektes der interessierende Wert.

Das Ausmaß der notwendigen Polarisierung hängt zudem vom elektrochemischen Zustand der Bewehrung in ihrer chemischen Umgebung ab. Basierend auf Messungen der Korrosionsrate ist die Höhe der Langzeitpolarisierung eine Funktion des Chloridgehaltes des Betons in Bewehrungstiefe (siehe Fig. 3). Bennett und Turk meinen in Referenz [10], daß 100 mV als brauchbarer Kompromiß weite Bereiche des Chloridgehaltes abdecken. Bei sehr korrosiven Umgebungen wird jedoch ein Wert von 150 mV empfohlen.

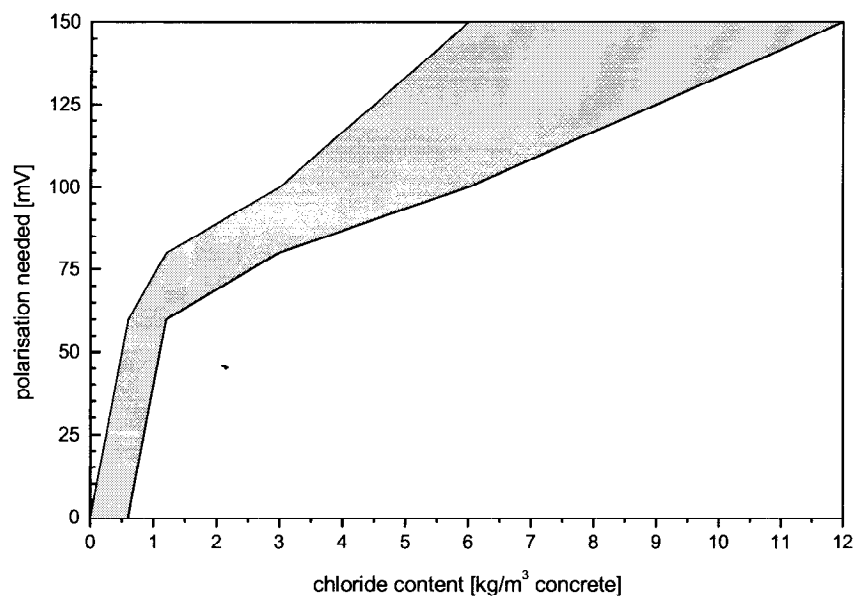


Fig. 3.: Erforderliche Depolarisierung als Funktion des Chloridgehaltes im Beton [10].

Ein potentiell Problem bei der Depolarisierungsmessung hat man bei sehr alten oder wassergesättigtem Beton. Bei diesen Fällen reichen 24 Stunden für die Depolarisierung bei weitem nicht aus [11]. Änderungen in den Umgebungsbedingungen (z.B. Gezeiten) oder Temperatur können ebenfalls die Depolarisierungskurve stark deformieren [12].

Laboruntersuchungen

Der Wert der Depolarisierung ist abhängig vom Übergangswiderstand Stahl/Beton, sowie der Schutzstromdichte [8, 9]. Der Potentialabfall (potential decay) erfolgt anscheinend

exponentiell mit der Zeit. Exponentielle Kurven für den Potentialabfall sind aus der elektrochemischen Technik der galvanostatischen Pulsmessungen bekannt [13]. Die Ähnlichkeit des Kurvenverlaufs konnte in Labormessungen gezeigt werden: Wie bei galvanostatischen Pulsmessungen änderte sich das Potential mit der Zeit (V_t) als Funktion der Parameter eines Korrosionsersatzschaltbildes (R_Ω in Serie mit einer Parallelschaltung von R_{ct} and C_{dl}):

$$V_t = I_{app} \cdot \left\{ R_{ct} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + R_\Omega \right\} \quad \text{eq. 1}$$

- t..... Zeit
- I_{app} Schutzstrom
- R_Ω Ohmscher Widerstand des Betons
- R_{ct} Übergangswiderstand
- τ Zeitkonstante für den Potentialabfall ($= R_{ct} \cdot C_{dl}$)
- C_{dl} Doppelschichtkapazität

Die obige Formel erlaubt für gegebene Werte von R_Ω , R_{ct} und τ eine Näherungsfunktion, die – obwohl sehr einfach – doch experimentelle Meßkurven sehr realistisch beschreibt. Wenn man experimentell bestimmte Werte für R_Ω and R_{ct} (gemessen in Betonprobekörpern mit 0 % und 3 % Chloridzusatz/Betonmasse) und eine realistische aber willkürlich gewählte Zeitkonstante von 1 Stunde einsetzt so erhält man simulierte Depolarisationskurven wie in Fig. 4 (aktive Bewehrung) und Fig. 5 (passive Bewehrung gezeigt. Der Ordinatenabschnitt bei $t = 0$ stellt dabei den iR -Abfall dar. Er ist das Produkt von I_{app} und R_Ω .

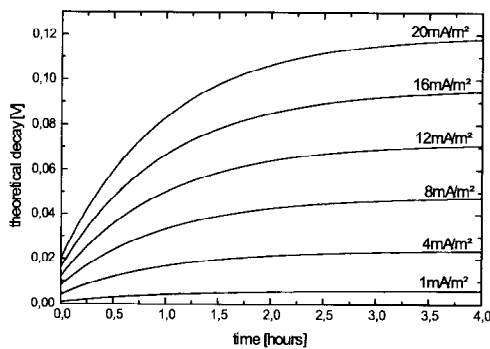


Fig. 4.: Simulierte Depolarisationskurven für aktiven Stahl ($I_{app} = 1, 4, 8, 12, 16, 20$ mA/m²; $R_\Omega = 10$ k Ω cm²; $R_{ct} = 50$ k Ω cm²)

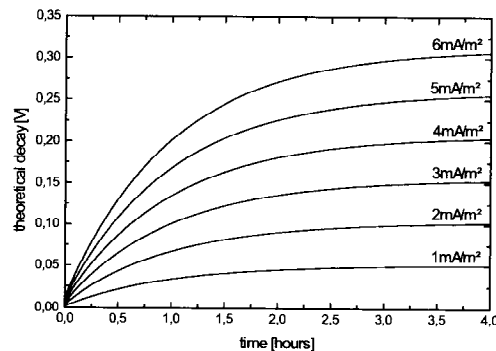


Fig. 5.: Simulierte Depolarisationskurven für passiven Stahl ($I_{app} = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ mA/m²; $R_\Omega = 20$ k Ω cm²; $R_{ct} = 500$ k Ω cm²)

Bei $t = \infty$ wird ein Wert für die Depolarisierung ($V_{t=\infty}$) ein Wert wie folgt gemessen:

$$V_{t=\infty} = I_{app} \cdot R_{ct} + I_{app} \cdot R_\Omega \Rightarrow \text{Decay} = I_{app} \cdot R_{ct} \quad \text{eq. 2}$$

Der Wert der Depolarisierung korreliert mit dem Übergangswiderstand Stahl/Beton. Der wiederum ist hoch für passiven Stahl und niedrig für aktiven Stahl. Der Ohmsche Widerstand

des Betons beeinflusst indirekt die Depolarisierung, weil er bei konstant angelegter Spannung die Höhe der Schutzstromdichte beträchtlich beeinflusst. Die hohe Zeitkonstante für die Relaxation des Potentials ($\tau \approx 1\text{h}$) ist keine typische elektrochemische Zeitkonstante für $\tau = R_{ct} \cdot C_{dl}$. In ihr enthalten sind auch der Konzentrationsausgleich der angrenzenden ionischen Schicht, welche hohe scheinbare Kapazitäten verursachen.

Das Model mit nur einer Zeitkonstante kann die Wirklichkeit nur unvollständig abbilden. Eine, oder mehrere zusätzliche Zeitkonstanten wären nötig, um den frühen Potentialabfall zu beschreiben, bzw. können auch nicht-exponentielle Terme von Einfluß sein. Die qualitative Vorhersage ist jedoch korrekt, wie Messungen an Laborproben zeigen (siehe Fig. 6).

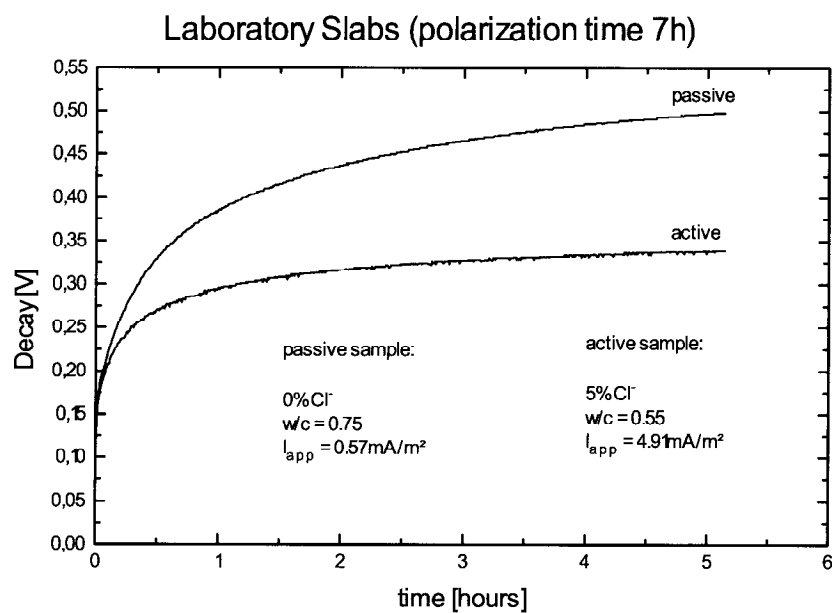


Fig. 6.: Depolarisationskurven an Laborproben.

Aufbau für die Messungen im Feld

Kathodischer Korrosionsschutz wurde für die Bewehrung in den Deckenflächen installiert. Als Anodenmaterial diente in allen Fällen eine elektrisch leitfähige Beschichtung, welche mit einer Epoxid/Zement-Verschleißschicht mechanisch geschützt wird. Als Referenzelektroden dienen MnO₂-Referenzelektroden [14]. Sie wurden in den anodischsten Stellen parallel zur Bewehrung in einem Abstand von ca. 1 cm von dieser installiert. Dabei wurde die Bewehrung nicht freigelegt. Die Gleichrichter vom Typ FIXVOLT IV [15] arbeiten im Konstant-Spannungsmodus. Als Kontroll- und Aufzeichnungseinheit dient das System *Camur* [15] mit einer Kapazität von 24 Meßkanälen für die Datenaufzeichnung und 2 Ausgangskanälen für die Steuerung von Gleichrichtern. Die Aufzeichnungseinheit ist mit einem Modem verbunden, mit dessen Hilfe die Daten im Intervall von ca. 3 Wochen abgerufen werden. Die Gleichrichterspannung ist dadurch ebenfalls aus der Ferne einstellbar. Die Auswertung der Meßdaten erfolgte über ein handelsübliches Tabellenkalkulationsprogramm.

Die Depolarisationsmessung erfolgte jeweils durch die Einheit *Camur*/FIXVOLT IV. Das Ausschaltpotential wurde innerhalb der ersten Sekunde bestimmt (0.5 sec).

Ergebnisse und Diskussion der Feldmessungen

Eine typische Messung der Depolarisierung des Bewehrungsstahls mit an unterschiedlichen Punkten eingebauten Referenzelektroden ist in Fig. 7 gezeigt. In diesem Diagramm sind verschiedene Ausformungen der Depolarisationskurve zu erkennen. Mit einigen Referenzelektroden mißt man hohe Depolarisierungswerte, mit anderen niedrige. An einigen Meßpunkten erfolgt die Depolarisation rasch, an anderen langsam. Wiederum bei einigen Meßpunkten bewegt sich das Bewehrungspotential nach einer kurzen Depolarisierung wieder in kathodische Richtung. Zuletzt sind an einigen Meßpunkten die Unterschiede des Einschalt- und Ausschaltpotentials (iR -Abfall) hoch, an anderen wiederum niedrig.

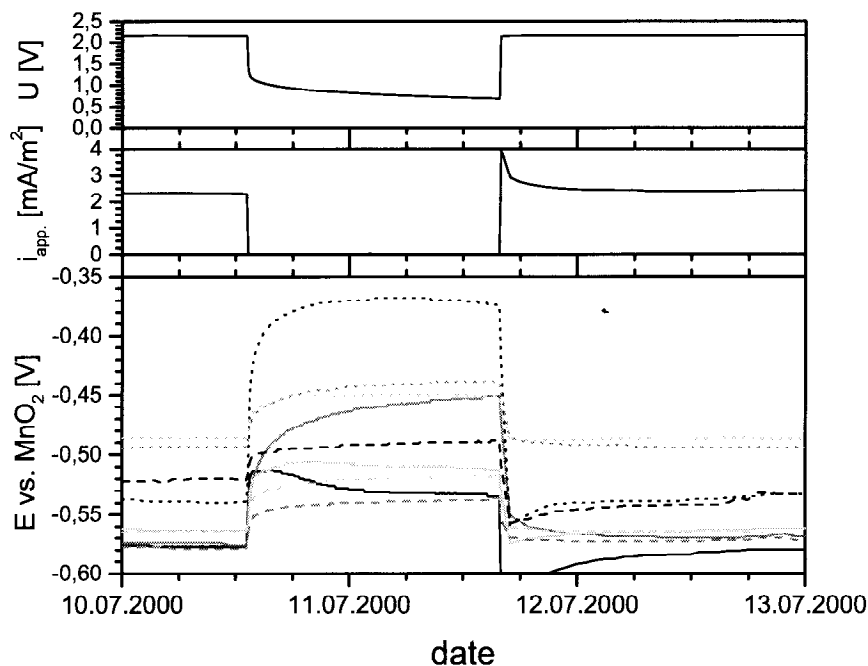


Fig. 7.: Typische Depolarisationskurven bei unterschiedlichen Meßpunkten einer Parkhausfläche.

Diese unterschiedlichen Erscheinungen kann man folgendermaßen interpretieren:

- Ein geringer elektrolytischer Widerstand zwischen Referenzelektrode und Bewehrung verursacht einen vergleichsweise geringeren iR -Abfall als ein hoher Betonwiderstand (bei vergleichbaren Schutzstromdichten).
- Eine schnelle Depolarisierung indiziert eine schnelle Umordnung der der Bewehrung vorgelagerten Ionen (hohe Beweglichkeit für die Ionen), eine langsame Depolarisierung deutet auf eine langsame Umordnung hin (pseudokapazitatives Verhalten der Stahl/Betongrenzschicht)
- Ein niedriger Wert für die Depolarisierung deutet auf aktiven Stahl hin, eine hohe auf passiven (bei vergleichbaren Schutzstromdichten).

- Eine Änderung des Potentials in kathodische Richtung nach einer kurzen Depolarisierungsphase deutet auf eine rasche Änderung des elektrochemischen Zustandes der Bewehrung hin: Möglicherweise diffundieren zuvor durch den KKS abgestoßene Chloridionen rasch wieder heran, bzw. diffundieren zuvor durch den KKS gebildete OH⁻-Ionen schnell von der Bewehrungs Oberfläche weg.

Bei chloridbelasteten Parkflächen sind in aller Regel Bereiche mit hohem Betonwiderstand wenig oder nicht chloridbelastet. Bereiche mit niedrigem Betonwiderstand dagegen deuten auf hohem Chloridgehalt hin. Gleichzeitig ist für gewöhnlich der Übergangswiderstand bei chloridkontaminiertem Beton geringer als bei chloridfreiem. Daher gehen hohe Betonwiderstände bei vergleichbarer Schutzstromdichte einher mit hohen Depolarisierungswerten.

In der Literatur wird häufig ein (re-)passivierender Effekt als Folgeerscheinung von kathodischer Langzeitpolarisation diskutiert. Bereits 1985 beschrieben Perenchio et al. [16] signifikante anodische Verschiebungen des statischen Bewehrungspotentiales an einer Laborprobe. Eine Untersuchung von KKS-Installationen an Brücken durch Broomfield zeigte, daß das durchschnittliche statische Bewehrungspotential sich nach 2 Jahren KKS um ca. 100 mV ins Anodische verschob [17]. Bertolini et al. wiederum wiesen darauf hin, daß der elektrochemische Ausgangszustand der Bewehrung und die Schutzstromdichte während der Periode der Polarisierung einen Einfluß auf den elektrochemischen Endzustand (nach der KKS-Periode). Sie beobachteten einen Anstieg der Depolarisationswerte mit der Dauer des kathodischen Schutzes (betrieben mit konstanter Stromdichte) für Bewehrung in chloridhaltigem und zugleich karbonatisierten Beton [18].

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht herauszufinden, welchen Gesetzmäßigkeiten Trends und Beziehungen zwischen dem statischen Bewehrungspotential vor Einschalten des KKS und dem statischen bewehrungspotential nach der KKS-Periode folgen. Um dies herauszufinden, wurden die Meßwerte auf einer statistischen Basis verarbeitet.

- Der Mittelwert, erhalten von den Referenzelektroden innerhalb einer Schutzzone, wurde verwendet. Das war der Mittelwert von mindestens 6 Referenzelektroden.
- Der Terminus Korrosionspotential E_{corr} bezeichnet das statische Bewehrungspotential vor Einschalten des KKS.
- Der Wert der Depolarisierung $\Delta E_{24\text{-h}}$ beschreibt die Potentialdifferenz zwischen dem Ausschaltpotential und dem Potential gemessen 24 Stunden nach dem Ausschalten des KKS.
- Als das neue statische Bewehrungspotential E_{new} wird der Potentialwert 24 Stunden nach dem Ausschalten des KKS bezeichnet (In den meisten Fällen war die Bewehrung nach 24 Stunden vollständig depolarisiert und eine kathodische Rückverschiebung des Potentials hat noch nicht eingesetzt).
- Die kurz vor dem Ausschalten des KKS gemessene Schutzstromdichte i_{prot} ging in die Überlegungen ein.
- Aus der Literatur ist bekannt (siehe vor allem Referenz [18], daß das Ausmaß der "Passivierung" (gemessen als anodische Verschiebung des Bewehrungspotentials) für aktiven Stahl von der Schutzstromdichte i_{prot} abhängig ist; daß jedoch für passiven Stahl die Schutzstromdichte keinen Einfluß auf eine anodische Potentialverschiebung hat.

Daher wurde in dieser Arbeit vor allem versucht eine allgemeine Beziehung zwischen den Parametern E_{corr} , $\Delta E_{24\text{-h}}$, E_{new} , und i_{prot} zu finden:

i_{prot} ist aber schon implizit im Depolarisationswert enthalten, wie die folgenden Gleichungen eq. 3 - eq. 5 zeigen:

Als grobe Annäherung wird die Stern-Geary Beziehung sowie der Wert der Depolarisierung zur Abschätzung der durchschnittlichen Korrosionsstromdichte i_{corr} der Bewehrung in einer Schutzzone herangezogen. Dabei wird zuerst der durchschnittliche Polarisationswiderstand R_p der Bewehrung aus der durchschnittlichen Depolarisierung und der Schutzstromdichte wie folgt berechnet:

$$R_p = \frac{\Delta E_{24\text{-h, avg.}}}{i_{\text{prot}}} \quad \text{eq. 3}$$

Die durchschnittliche Korrosionsstromdichte für die Bewehrung für eine Schutzzone beträgt demnach:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad \text{eq. 4}$$

$B = 26 \text{ mV}$ (Stern-Geary Konstante)

Wenn man die beiden Gleichungen eq. 3 and eq. 4 kombiniert erhält man eine Beziehung zwischen der Depolarisierung und dem Verhältnis der Schutzstromdichte zur Korrosionsstromdichte $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$.

$$\Delta E_{24\text{-h, avg.}} = B \cdot \frac{i_{\text{prot}}}{i_{\text{corr}}} \quad \text{eq. 5}$$

Diese einfache Beziehung wurde 1997 von Glass et al. beschrieben [8]: Wenn man die Depolarisierungswerte gegen das Verhältnis $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$ aufträgt, so erhält man (bis ca. 100 mV) eine lineare Beziehung mit einem Anstieg der in etwa $B (= 26 \text{ mV})$ beträgt (siehe Fig. 8).

Das Verhältnis von $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$ ist anscheinend die Ursache für die Verschiebung des statischen Bewehrungspotentials in positive Richtung. Jedoch findet bei bereits passiver Bewehrung offensichtlich keine weitere Verschiebung des Potentials in positive Richtung statt. Daher ist als zweiter wesentlicher Parameter das Korrosionspotential E_{corr} anzusehen. Ausgehend von diesen beiden Parametern wird versucht eine Vorhersage des neu sich einstellenden statischen Bewehrungspotentials E_{new} zu wagen.

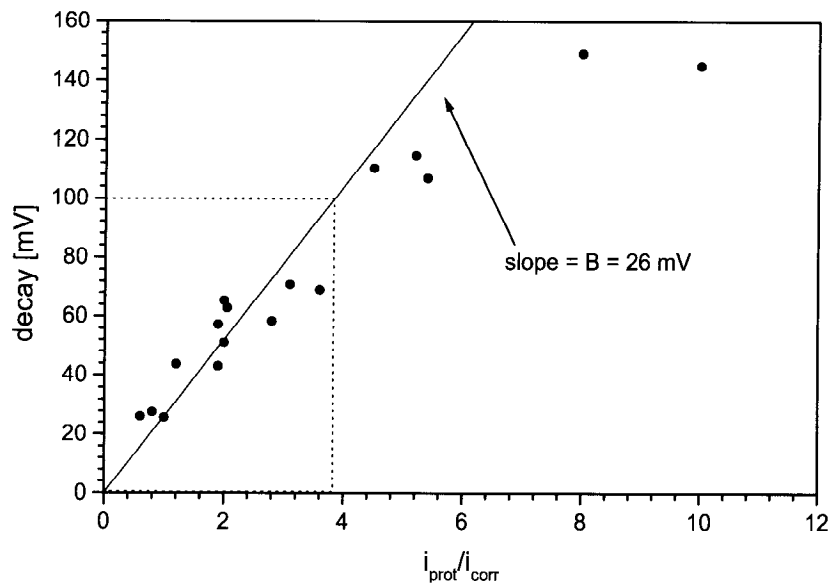


Fig. 8: Empirischer Zusammenhang zwischen der Depolarisierung und dem Verhältnis der Schutz- zur Korrosionsstromdichte $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$ nach Referenz [8].

Als erster Schritt wurde der Wert von E_{new} als Funktion von E_{corr} und $\Delta E_{24\text{-h}}$ für verschiedene Fälle analysiert. Fig 9 Zeigt die Differenz zwischen E_{new} und E_{corr} als Funktion von $\Delta E_{24\text{-h}}$ für aktiv korrodierende Bewehrung (E_{corr} stark negativ). Fig. 10 die Situation für passive Bewehrung (E_{corr} stark positiv). Für die aktiv korrodierende Bewehrung ist die Steigung in etwa 1, dagegen gilt für die passive Bewehrung annähernd $E_{\text{new}} = E_{\text{corr}}$. (Die Bewehrung ist ja bereits passiv.) In Referenz [18] ist ebenfalls keine Änderung des statischen Bewehrungspotentials für passive Bewehrung beobachtet worden.

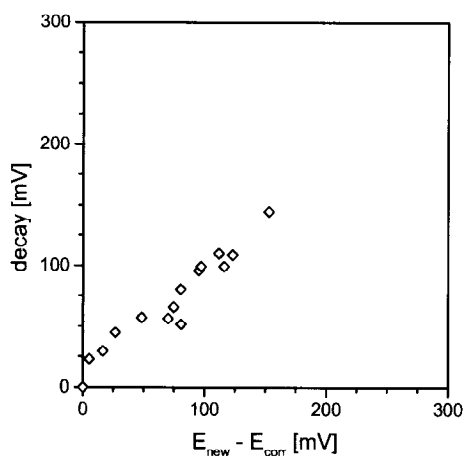


Fig. 9.: $\Delta E_{24\text{-h}}$ aufgetragen gegen die anodische Potentialverschiebung ($E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$) für *aktive* Bewehrung. $E_{\text{corr}} = -548$ mV vs. MnO_2 . (Jeder Wert ein Mittelwert aus 9 Einzelmessungen).

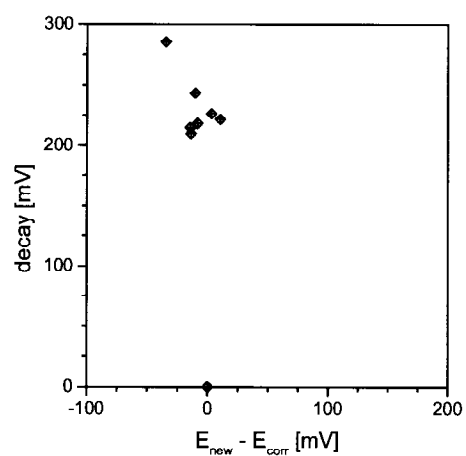


Fig. 10.: $\Delta E_{24\text{-h}}$ aufgetragen gegen die anodische Potentialverschiebung ($E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$) für *passive* Bewehrung. $E_{\text{corr}} = -311$ mV vs. MnO_2 . (Jeder Wert ein Mittelwert aus 6 Einzelmessungen).

Für korrodierende Bewehrung ist das beobachtete Verhalten äußerst interessant und gibt Anlaß zur Frage: Gibt es überhaupt KKS-induzierte (Re-)Passivierung? Wie Fig. 11 zeigt ist das Ausmaß der anodischen Verschiebung des statischen Bewehrungspotentials eine Funktion der Depolarisierung. Sobald die Depolarisierung (z.B. durch Absenken der Schutzstromdichte i_{prot} während der KKS-Periode) erniedrigt wird, so ändert sich auch das neue statische Bewehrungspotential in kathodische Richtung. Das müßte bedeuten, daß das statische Bewehrungspotential welches nach einer Depolarisierung sich einstellt nicht stabil ist. Sonst dürfte das nächste neue statische Bewehrungspotential, welches sich nach einer der ersten Depolarisierung und weiteren KKS-Periode folgenden geringeren Depolarisierung (aufgrund geringerer Schutzstromdichte) einstellt, nicht niedriger sein. Dies ist jedoch der Fall.

Der nachhaltige Schutz der Bewehrung scheint sich bei geringerer Polarisierung zu verringern. Eine "(Re-)Passivierung", welche sich aufgebaut haben soll, ist also nicht stabil.

Eine weitere interessante Beobachtung für aktive Bewehrung ist, daß selbst wenn das iR -freie Schutzpotential ungefähr gleich dem Korrosionspotential ist (mit Ausnahme einer kurzen Zeit nach dem ersten Einschalten von KKS), daß sich dennoch eine Polarisierung (gemessen als Depolarisierung) aufbaut, die mit der Zeit noch zunimmt (Fig. 12).

Ein ähnliches Verhalten wurden in Referenz [18] beschrieben: Weiters wird berichtet, daß des iR -freie Schutzpotential nach einer anfänglichen KKS-Periode Werte annehmen kann, welche beträchtlich positiver werden können als das Korrosionspotential, welches vor Anlegen des Schutzes gemessen wurde [19, 20]. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, daß die chemische Umgebung der Grenzschicht Stahl/Beton insofern verändert wird, als daß die aggressive Natur dieser lokalen Umgebung graduell verbessert wird. Der Prozeß kann Monate bis Jahre dauern [19]. Der Korrosionszustand der Bewehrung "verbessert sich" mit der Zeit.

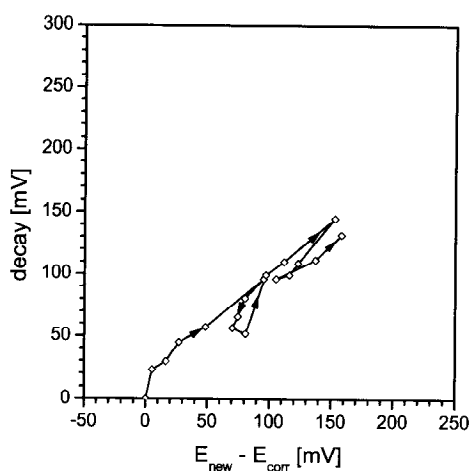


Fig. 11.: Durchschnittliche Depolarisierungswerte aufgetragen gegen durchschnittliche anodische Potentialverschiebung ($E_{new} - E_{corr}$) für aktiv korrodierende Bewehrung (gleiche Werte wie in Fig. 9), wo die Abnahme von $E_{new} - E_{corr}$ mit abnehmender Depolarisierung ersichtlich wird, und umgekehrt.

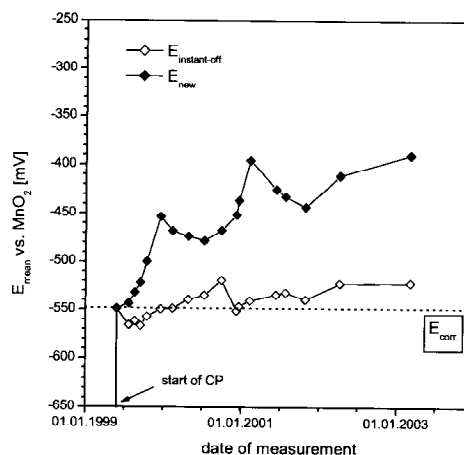


Fig. 12.: Entwicklung des iR -freien Schutzpotentials $E_{instant-off}$ und des neuen statischen Bewehrungspotentials E_{new} mit der Dauer von KKS (gleiche Rohdaten wie in Fig. 11).

Je weniger aktiv die Bewehrung, desto weniger ändert sich das neu sich einstellende statische Bewehrungspotential, bis schließlich bei passiver Bewehrung das E_{new} unabhängig von der

Depolarisierung wird (siehe Fig. 13, 15, und 17). Gleichzeitig bleibt auch das iR-freie Schutzpotential negativer in Bezug auf E_{corr} je weniger aktiv die Bewehrung. Während bei der minder aktiven Bewehrung (Fig. 14) das iR-freie Schutzpotential nach knapp zwei Jahren positiver wird als E_{corr} , so bleibt es bei der wenig aktiven und passiven Bewehrung auf Dauer weit negativer als E_{corr} über den gesamten KKS-Zeitraum (Fig. 16 und Fig. 18). Fig. 18 zeigt auch deutlich, daß das neu sich einstellende statische Bewehrungspotential vom iR-freien Schutzpotential unbeeinflusst bleibt.

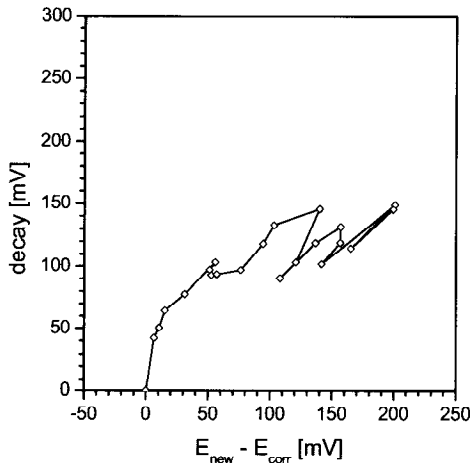


Fig. 13.: Durchschnittliche Depolarisierungswerte aufgetragen gegen durchschnittliche anodische Potentialverschiebung ($E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$) für minder aktiv korrodierende Bewehrung.

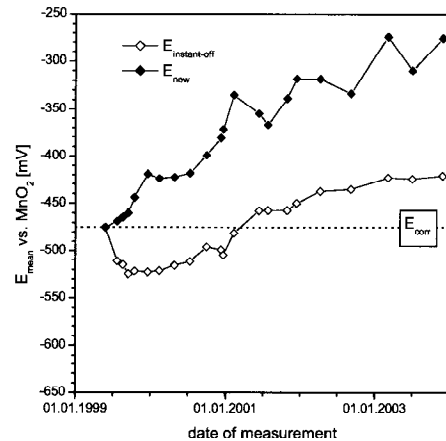


Fig. 14.: Entwicklung des iR-freien Schutzpotentials $E_{\text{instant-off}}$ und des neuen statischen Bewehrungspotentials E_{new} mit der Dauer von KKS (gleiche Rohdaten wie in Fig. 13).

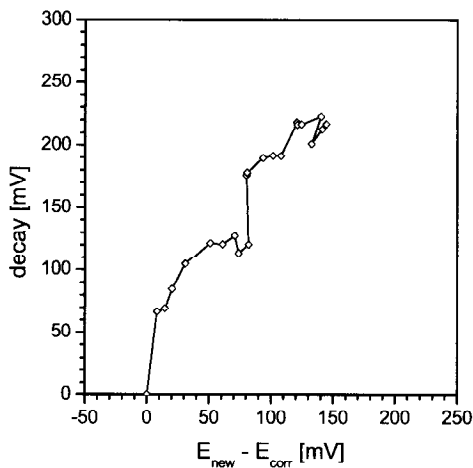


Fig. 15.: Durchschnittliche Depolarisierungswerte aufgetragen gegen durchschnittliche anodische Potentialverschiebung ($E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$) für wenig active Bewehrung.

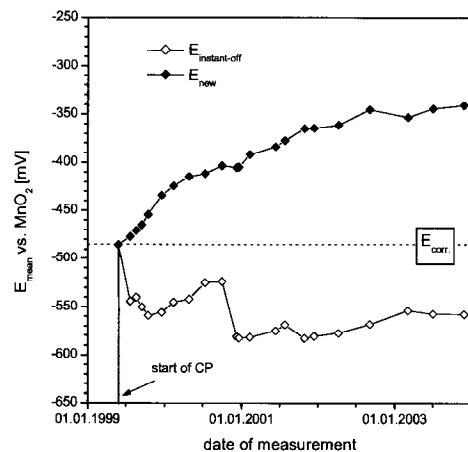


Fig. 16.: Entwicklung des iR-freien Schutzpotentials $E_{\text{instant-off}}$ und des neuen statischen Bewehrungspotentials E_{new} mit der Dauer von KKS (gleiche Rohdaten wie in Fig. 15).

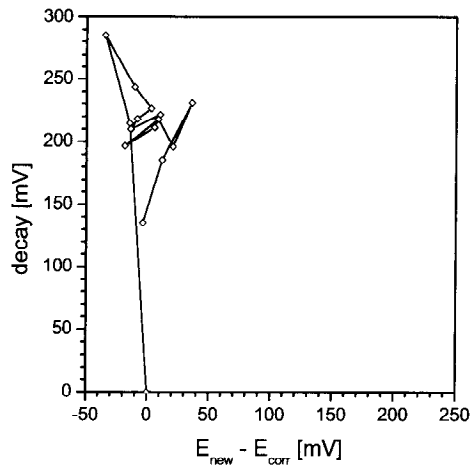


Fig. 17.: Durchschnittliche Depolarisierungswerte aufgetragen gegen durchschnittliche anodische Potentialverschiebung ($E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$) für passive Bewehrung.

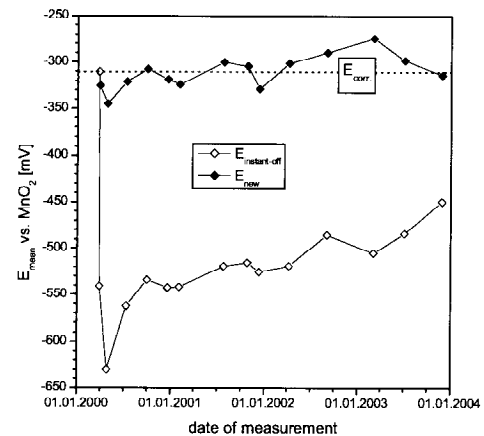


Fig. 18.: Entwicklung des iR-freien Schutzpotentials $E_{\text{instant-off}}$ und des neuen statischen Bewehrungspotentials E_{new} mit der Dauer von KKS (gleiche Rohdaten wie in Fig. 17).

Berechnung von E_{new}

Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen besteht eine Beziehung zwischen dem Wert der Depolarisierung $\Delta E_{24\text{-h}}$ und dem Wert für $E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$. Diese Beziehung ist zudem abhängig vom ursprünglichen Korrosionspotential E_{corr} . Die Abhängigkeit von E_{corr} soll geringer werden, je anodischer E_{corr} ist und soll für passive Bewehrung gänzlich verschwinden. Vom linearen Verhalten bei aktiver Bewehrung (Fig. 9) abgeleitet könnte die Korrelation von der Form:

$$\Delta E_{24\text{-h}} = a + b \cdot (E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}) \quad \text{eq. 6}$$

Folgende Überlegungen wurden angestellt:

- Der Term 'a' verschwindet für aktiv korrodierende Bewehrung (E_{corr} sehr negative)
- Der Term b soll für aktiv korrodierende Bewehrung ungefähr 1 werden.

Eine Gleichung die obige Bedingungen annähernd erfüllt wäre:

$$\Delta E_{24\text{-h}} = (E_{\text{corr}} - E_{\text{char}}) + \frac{E_{\text{corr}}}{E_{\text{char}}} \cdot (E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}) \quad \text{eq. 7}$$

E_{char} ist als "charakteristisches Potential" für den Fall anzusehen bei der die Steigung für die Beziehung $\Delta E_{24\text{-h}}$ gegen $E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}$ gleich 1 ist. Der Wert für E_{char} muß offensichtlich sehr negativ sein. Für die verwendeten Meßdaten eignet sich ein Wert von -525 mV (gegen MnO_2) am besten.

Es muß natürlich darauf hingewiesen werden, daß die Beziehung eq. 7 keine korrekte Gleichung ist. Für die Randbedingungen stimmt der Ausdruck nicht mehr. Für den in Betracht kommenden Potential- und Depolarisierungsbereich ist die Beziehung jedoch gut erfüllt:

Aus den Daten für das ursprüngliche Korrosionspotential und der Depolarisierung läßt sich nun das neu sich einstellende statische Bewehrungspotential nach Abschalten mit folgender Beziehung vorhersagen:

$$E_{\text{new}} \approx (E_{\text{corr}} - E_{\text{char}}) + \frac{E_{\text{char}}}{E_{\text{corr}}} \cdot (E_{\text{new}} - E_{\text{corr}}) \quad \text{eq. 8}$$

Die Vorhersage bei Verwendung von Beziehung eq. 8 eignet sich überaus gut für die 13 Schutzzonen (Zonengröße zwischen 700 und 1200 m², Anzahl der Meßelektroden per Zone > 6) von 4 KKS-Installationen. Dabei gibt es Zonen mit durchwegs aktiv korrodierender Bewehrung, mit durchwegs passiver Bewehrung und Bewehrung in unterschiedlichen Zwischenzuständen. Fig. 19 und Fig. 20 zeigen eindeutig, daß die Vorhersage mit dem Meßwert gut übereinstimmt.

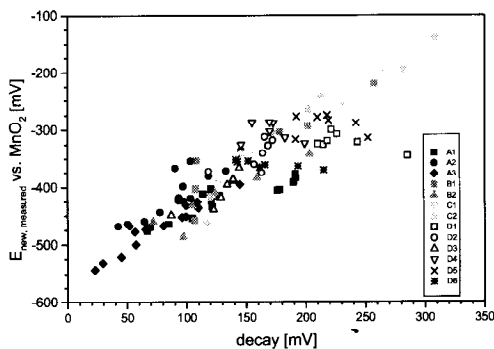


Fig. 19.: Measured dependence of E_{new} on the amount of decay for various active and passive CP-zones.

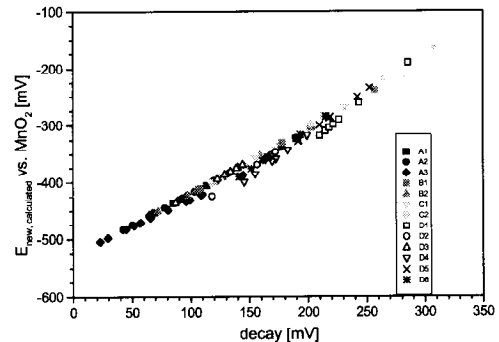


Fig. 20.: Calculated dependence of E_{new} on the amount of decay using eq. 8 for the same structures.

Die Abweichung der Vorhersage von jeder einzelnen Depolarisierungsmessung für eine Zone vom Meßwert wird durch das Histogramm in Fig. 21 dargestellt. Die Verteilung folgt einer Gaußkurve mit dem Maximum der Verteilungskurve bei 0 mV. Die Standardabweichung beträgt 33 mV. Die Vorhersage ist also sehr präzise.

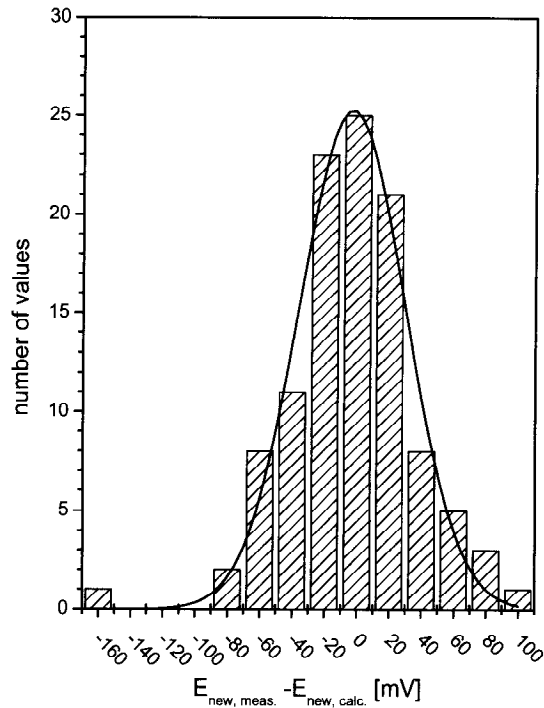


Fig. 21.: Abweichung des gemessenen Wertes vom vorhergesagten für E_{new} . (Gaußverteilung mit $\sigma = 33$ mV).

Zusammenfassung

Der Wert der Depolarisierung ist eine Funktion des Verhältnisses $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$ und kann durch Gleichung eq. 5 beschrieben werden. Überschreitet das Verhältnis einen Wert von 4, sind 100 mV erreicht. Der Wert ist ziemlich reversible; bei Erniedrigung des Verhältnisses verringert sich der Wert der Depolarisierung wieder.

Der kathodische Schutz bewirkt – zumindest eine temporäre – Verschiebung des Korrosionspotentials zu positiveren Werten. Diese Verschiebung ist abhängig vom Verhältnis $i_{\text{prot}}/i_{\text{corr}}$ (ausgedrückt durch den Wert der Depolarisierung $\Delta E_{24\text{-h}}$).

Eine qualitativ richtige Beziehung zwischen dem neu sich einstellenden statischen Bewehrungspotential E_{new} und dem ursprünglichen Korrosionspotential E_{corr} , sowie der Depolarisierung $\Delta E_{24\text{-h}}$ wurde gefunden. Damit läßt sich dieses vorhersagen.

Als weiterer Parameter wäre die Dauer des KKS in ein Vorhersagemodell miteinzubeziehen.

Danksagung

Die Messungen konnten dankenswerterweise an KKS-Installationen der Firma Protector as./Norwegen durchgeführt werden.

Literatur und Referenzen

- 1 J.E. Bennett, T. A. Mitchell
Depolarization Testing of Cathodically Protected Reinforcing Steel in Concrete
Materials Performance, **29/12**, 20-25 (1990)
- 2 NACE Standard RP0290-90
Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures
(Houston, TX - NACE, 1990)
- 3 European Standard EN 12696
Cathodic protection of steel in concrete
European Committee for Standardization, rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels, March 2000
- 4 S.P. Ewing
Potential Measurements for Determining Cathodic Protection Requirements
Corrosion, **7**, 410-416 (1951)
- 5 M. Funahashi, W.T. Young
Investigation of 100 mV Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete
CORROSION/92, paper no. 193, NACE, Houston, TX, 1992
- 6 K. Takewaka
Cathodic Protection for Reinforced-Concrete and Prestressed-Concrete Structures
Corrosion Science, **35**, 1617-1626 (1993)
- 7 J. Bartholomew, J. Bennett, T. Turk, W.H. Hartt, D.R. Lankard, A.A. Sagüés, R. Savinell
Control Criteria and Materials Performance Studies for Cathodic Protection of Reinforced Concrete
SHRP-S-670, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC 1993
- 8 G.K. Glass, A.M. Hassanein, N.R. Buenfeld
Monitoring the Passivation of Steel in Concrete Induced by Cathodic Protection
Corrosion Science, **39**, 1451-1458 (1997)
- 9 G.K. Glass
The 100-mV Potential Decay Cathodic Protection Criterion
Corrosion, **55**, 286-290 (1999)
- 10 J. Bennett, T. Turk
Technical Alert
Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements
SHRP-S-359, National Research Council, Washington, DC, 1994
- 11 G. Gedge, T. Sheehan
Cathodic protection of the North Seaton bridge
in: "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", ed. By C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, ISBN 0-85404-731-X, SCI 1996, pp. 422-430

- 12 B. Sederholm, B. Lindner
Long term monitoring of cathodic protection of partly submerged concrete structures in Sweden – Influence of climatic factors
'UK Corrosion and Eurocorr 94' Chamelton Press, London, **3**, 189-200 (1994)
- 13 B. Elsener, S. Müller, M. Suter, H. Böhni
Corrosion Monitoring of steel in concrete - theory and practice
in: Corrosion of Reinforcement in Concrete, pp.348-357
edited by C.L. Page, K.W.J. Treadaway, P.B. Bamforth, Elsevier 1990
- 14 Arup, H., Klinghoffer, O. and Mietz, J., 'Manganese Dioxide Reference Electrodes for Use in Concrete', Proceedings of EUROCORR'97, ed. by E. Bardal, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1997
- 15 Product of PPROTECTOR AS., Norway (www.protector.no)
- 16 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
- 17 J.P. Broomfield
Field Survey of Cathodic Protection on North American Bridges
Materials Performance, **31/9**, 28-33 (1992)
- 18 L. Bertolini, F. Bolzoni, P. Pedferri and T. Pastore
Cathodic Protection of Reinforcement in Carbonated Concrete
Corrosion98, Paper 639, NACE, Houston, TX, 1998
- 19 G.K. Glass, A.M. Hassanein, N.R. Buenfeld
CP Criteria for Reinforced Concrete in Marine Exposure Zones
Journal of Materials in Civil Engineering, **12**, 164-171 (2000)
- 20 G.K. Glass, J.R. Chadwick
An investigation into the mechanisms of protection afforded by a cathodic current and the implications for advances in the field of cathodic protection
Corrosion Science, **36**, 2193-2209 (1994)