

Elektrische Eigenschaften von Mörteln für kathodischen Korrosionsschutz

Franz Pruckner*
V&C Kathodischer Korrosionsschutz Ges.m.b.H.
Josef Perger-Straße 2/A-05
A-3031 Pressbaum

Schlüsselwörter: Stahlbeton, Instandsetzung, kathodischer Korrosionsschutz, Einbettmörtel, Elektrotechnische Eignung

Einleitung

Die Technologie des kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) wurde weltweit erstmals 1824 von Sir Humphrey Davy angewandt, der im Auftrag der britischen Admiralität die korrosionsgefährdete Kupferverkleidung eines Kriegsschiffes mit Opferanoden aus Eisen erfolgreich kathodisch schützte.

Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton wurde erstmals an der San Mateo – Hayward Brücke über die Bucht von San Francisco angewandt. Dieses Forschungsprojekt wurde als Erfolg angesehen und bildete die Grundlage für die erste kommerzielle Installation von KKS an der Sly-Park Brücke mit elektrisch leitendem Asphalt als Anode im Jahre 1973 [1, 2]. KKS von Stahl in Beton hat seit dieser Zeit eine rasante Entwicklung durchgemacht, wie auch die Verwendung von verschiedenen Anodenmaterialien.

Kathodische Korrosionsschutzsysteme lassen sich am einfachsten durch die verwendeten Anodenmaterialien unterscheiden. Die Anode ist die wichtigste Komponente einer kathodischen Korrosionsschutzanlage. Aufgrund der äußerst niedrigen Leitfähigkeit des Betons soll die Anode vorzugsweise die gesamte Oberfläche des Betons bedecken. Die laterale Schutzwirkung ist nur für kurze Distanz gegeben. Labormessungen zeigten einen lateralen Einfluß des Schutzstromes auf nur 15 cm für streifenförmige Anoden [3] (siehe Abbildung 1).

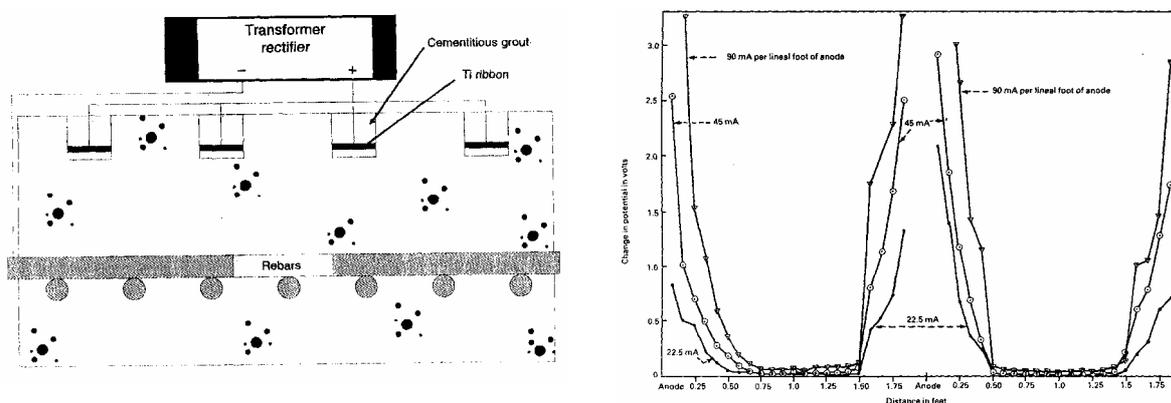


Abbildung 1: Typisches Layout für streifenförmige Anode (links) und laterale Verteilung der Polarisierung der Bewehrung (rechts)

* franz.pruckner@vc-austria.com

Das heißt zum Beispiel, daß bei Verwendung von streifenförmigen Anoden der Abstand dieser Anoden voneinander 30 cm nicht überschreiten soll.

Da beim kathodischen Korrosionsschutz die Korrosionsreaktion auf die Anode verlagert wird, ist die Anodenoberfläche extremen Bedingungen ausgesetzt. Des weiteren sollen die schädlichen Auswirkungen der anodischen Reaktion auf die Umgebung der Anode nicht unterschätzt werden. Verschiedene Anodensysteme weisen in der jetzt 30-jährigen Geschichte von KKS von Stahl in Beton eine beachtliche Referenzliste auf und die Bearbeitung ist für viele Materialien bekannt.

Anodensysteme, die per dato eingesetzt werden, umfassen im wesentlichen folgende Materialien:

- MMO-Titangitter, eingebettet in Spritzbeton*
- MMO-Titannetzstreifen, eingebettet in Mörtel
- Stabförmige Anoden aus Titan-MMO
- MMO-Titan Beschichtungen im Spritzverfahren
- Röhrenförmige Anoden aus leitender Keramik
- Leitende Beschichtungen auf Kohlenstoffbasis
- Netzförmige Anoden auf Kohlenstoffbasis
- elektrisch leitende Mörtel

In dieser Arbeit wird das System der netzförmigen Titananode, eingebettet in Spritzbeton behandelt, und speziell auf das Einbettmaterial näher eingegangen.

Die netzförmige Titananode in zementöser Einbettung

Netzförmige Anoden als Streckmetallgitter aus MMO beschichtetem Titan für kathodischen Schutz von Stahl in Beton wurden erstmals ca. 1985 eingesetzt [4]. Dieses Anodenmaterial zeichnet sich durch extreme Langlebigkeit aus – die Lebensdauer wird praktisch nur durch die Einbettmasse beschränkt - und durch eine sehr gleichmäßige Schutzstromverteilung. Dieser Anodentyp ist heute der am häufigsten eingesetzte.

Das System besteht aus der netzförmigen "Sekundäranode" (erhältlich in Rollen zu ca. 70 - 80 m Länge und ca. 1.20 m Breite) und Titanblechstreifen, welche als Primäranode für die Stromzuführung sorgen (Abbildung 3). Die Titanblechbänder werden via Kabel an den positiven Ausgang des Gleichrichters angeschlossen, die Bewehrung, dagegen an den negativen Ausgang.

Die Anodenmaterialien werden mit nichtmetallischem Befestigungsmaterial in Rücksicht auf Kurzschlußgefahr auf der Betonoberfläche befestigt (Abbildung 2) und in die zementöse Übersichtung eingebettet (Abbildung 4).

* MMO (engl.) "mixed metal oxide". Titan ist mit Mischmetalloxiden beschichtet, welche die elektrochemischen Eigenschaften der Titananode ermöglichen. Es handelt sich hierbei um eine Mischung von Edelmetalloxiden (z.B.: Ir_2O_3 , Ru_2O_3)

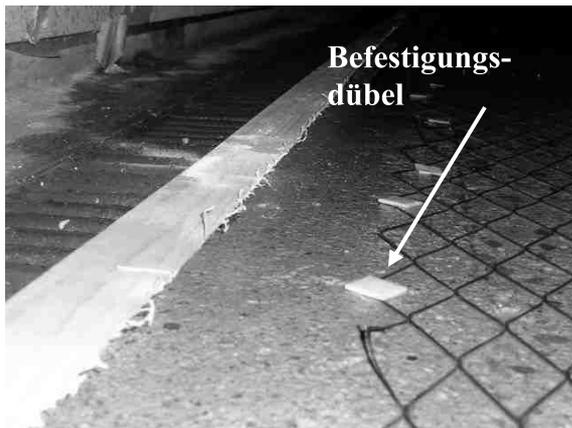


Abbildung 2: Befestigung des Gitters

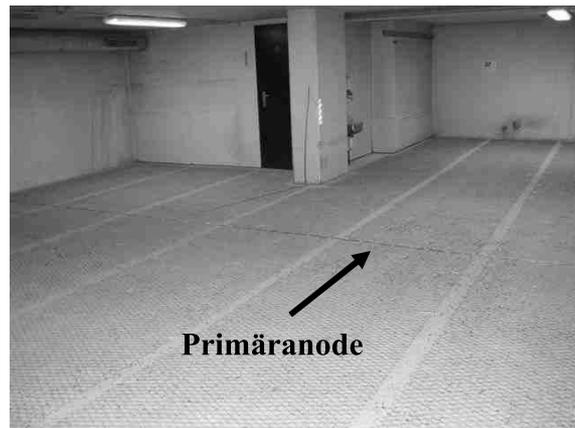


Abbildung 3: Anoden-Layout



Abbildung 4: Aufbringen des Einbettmörtels



Bekannte Probleme mit Einbettmörteln

a) betontechnologische Probleme

Das Einbettmaterial, oftmals als Spritzmörtel aufgebracht, zeigte in der Vergangenheit bestimmte Probleme. Vor allem die Haftung des Spritzmörtels zum Untergrund erwies sich als entscheidender, die Lebensdauer beeinflussender Parameter (siehe Abbildung 5). Es wurden zahlreiche Untersuchungen angestellt und Versuche durchgeführt, dieses Problem zu minimieren. Frühe Empfehlungen darauf waren umfassende Oberflächenbehandlung durch Sandstrahlen, Verwendung von Abstandshaltern, welche das Titangitter mehrere Millimeter von der gereinigten Oberfläche entfernt halten, Oberflächenkonditionierung durch Wassersättigung vor Aufbringen der Einbettmasse und Aushärten der Einbettmasse unter erhöhter Umgebungsfeuchte [5].

Diese Haftungsprobleme sind jedoch betontechnologischer Natur und haben mit den elektrochemischen Reaktionen und den physikalisch/chemischen Transportprozessen nicht direkt etwas zu tun [6]. In weiterer Folge wird diese Problematik nicht weiter behandelt.

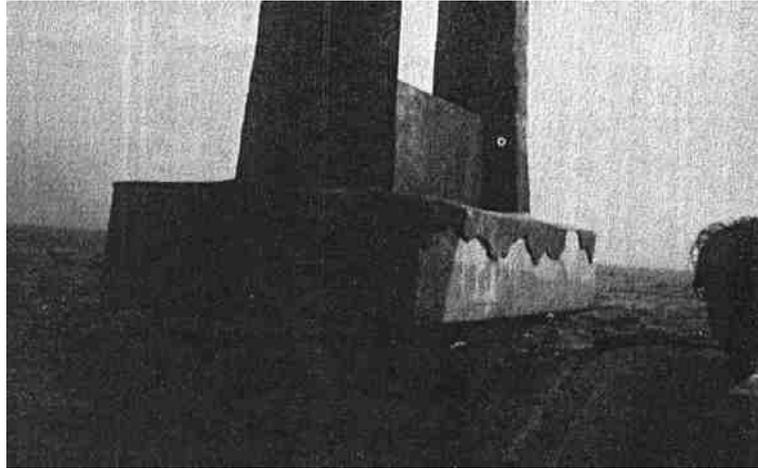


Abbildung 5: Ablösungserscheinungen eines Einbettmörtels aufgrund äußerer Einflüsse.

b) elektrochemische und physikalisch/chemische Probleme

Diese Art der Probleme wird hauptsächlich durch "ungünstige chemische Eigenschaften" des Einbettmaterials verursacht. Dazu zählen:

- ungenügende alkalische Pufferkapazität
- ungenügende elektrische Leitfähigkeit

Diese beiden Parameter (Pufferkapazität, Leitfähigkeit) werden im folgenden unter verschiedenen Gesichtspunkten abgehandelt.

Die alkalische Pufferkapazität

Einen wesentlichen und für die Langlebigkeit des Anodensystems bedeutenden Parameter stellt die alkalische Pufferkapazität des Einbettmaterials dar. Die Pufferkapazität wird durch den Portlanditgehalt des Zementsteins gewährleistet. Portlandit (oder $\text{Ca}(\text{OH})_2$), entstanden durch die Hydratisierung der Calciumsilikate des Zementklinkers, steht für etwa 20 % des Zementsteins und sorgt durch eine Gleichgewichtsreaktion zwischen festem und gelöstem Calciumhydroxid für einen konstanten pH-Wert des Betonporenwassers von (theoretisch) 12.6.



Wenn die Konzentration von OH^{-} im Porenwasser einen gewissen Grenzwert überschreitet, wird Calciumhydroxid aus der Porenlösung ausgefällt, nimmt andererseits die Konzentration an Hydroxyionen im Porenwasser ab, so geht Calciumhydroxid in Lösung. Dadurch wird ein konstanter pH-Wert von ca. 12.6 im Betonporenwasser aufrechterhalten.

Durch die elektrochemische Reaktion an der Anode



werden die Hydroxyionen des Betonporenwassers ständig verbraucht. Andererseits werden immer wieder "neue" Hydroxyionen aus dem Betonporenwasser an die Anode nachgeliefert,

welche aufgrund der Gleichgewichtsreaktion, beschrieben mit Formel 1, ständig nachgebildet werden. Können die Hydroxylionen jedoch nicht schnell genug aus dem Betonporenwasser nachgeliefert werden, oder ist der Portlandit vollständig aufgebraucht, so bildet sich rund um die Anode ein stark saurer Elektrolyt, welcher schädigend auf das Zementsteingefüge einwirkt und so die Kontaktfläche zwischen Anode und Beton verringert. Der Grad der Ansäuerung läßt sich einfach durch die Indikatorreaktion mit Phenolphthalein nachweisen, wie aus zwei Proben mit unterschiedlicher Pufferkapazität in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt. Diese Ansäuerungserscheinung – man bezeichnet sie als Anodenhof – wurde auch in der Praxis beobachtet [6].

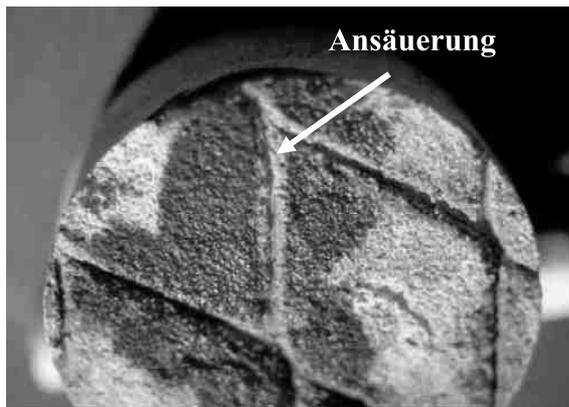


Abbildung 6 Einbettmaterial mit geringer Pufferkapazität (Indikatorreaktion zeigt Ansäuerung rund um die Anode)*.

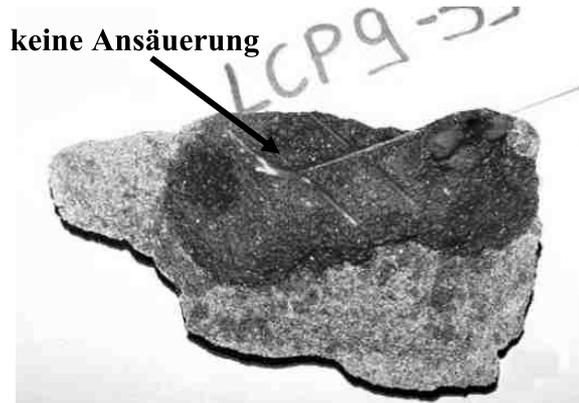


Abbildung 7 Einbettmaterial mit hoher Pufferkapazität (Indikatorreaktion zeigt keine Ansäuerung rund um die Anode)‡.

Naturgemäß steigt die Pufferkapazität mit dem Gehalt an Zement. Je höher der Zementgehalt, desto höher der Gehalt an Portlandit. Ebenfalls beeinflussen der Zementtyp und der Zusatz an puzzolanischen Stoffen die Pufferkapazität. Die Pufferkapazität läßt sich annähernd bestimmen, wenn einer aufgeschlämmten Probe aus pulverisiertem Beton soviel Säure zugesetzt wird, bis ein pH-Wert von 10 erreicht ist. Resultate aus solch einer Meßserie sind in Tabelle 1 für unterschiedliche Zementmörtel, welche sich nur durch die Art des Binders unterscheiden, gelistet.

<i>verwendeter Zementtyp (275 kg/m³)</i>	<i>Säuremenge [mol/kg Probe]</i>
Portlandzement	2.30
Sulfatbeständiger Zement	2.08
Portlandzement + 30 % Flugasche	1.83
Portlandzement + 65 % Hochofenschlacke	1.73

Tabelle 1: Menge an Säure, die nötig ist um den pH Wert von Aufschlämmungen von pulverisierten Zementmörtelproben auf 10 zu reduzieren (aus [7])

Bei der anodischen Reaktion wird pro umgesetztem Elektron gemäß Formel 2 ein Säuremolekül frei. Unter der Annahme, daß die Masse des Einbettmörtels 25 kg/m² beträgt (1 cm Dicke, Dichte: 2500 kg/m³) wäre bei einer Schutzstromdichte von 10 mA/m² Betonoberfläche die gesamte Alkalität des Einbettmaterials (Portlandzementgehalt: 275 kg/m³) nach 17.6 Jahren aufgebraucht (Gleichung 1):

* © Luc Westhof, www.degussa.com

$$L = \frac{PK \cdot m_{\text{Mörtel}} \cdot F}{i \cdot t_s}$$

Gleichung 1

- mit: L Lebensdauer [Jahre]
 PK..... Pufferkapazität [mol/kg Mörtel]
 $m_{\text{Mörtel}}$.. Mörtelmasse pro Einheitsfläche [kg/m²]
 F Faradaykonstante (96485 C/mol)
 i..... Stromdichte [A/m²]
 t_s Ein Jahr in Sekunden (31557600 s/Jahr)

Nun wird aber in den Anforderungsspezifikationen an KKS oft eine Designlebensdauer von 40 Jahren angegeben. Für diese Designlebensdauer wäre demnach bei gleicher Schichtdicke und gleicher Schutzstromdichte ein Mörtel mit einem Portlandzementgehalt von 625 kg/m³ nötig. Dann wäre die Pufferkapazität des Einbettmaterials theoretisch erst nach 40 Jahren aufgebraucht.

Steinkohlenflugasche, aber vor allem Silicastaub (Microsilica) reduzieren die alkalische Pufferkapazität beträchtlich. Bei einer Zugabe von über 15 M-% an Silicastaub wird Portlandit vollständig verbraucht [8]. Eine Einbettmasse mit beträchtlichen Mengen an Silicastaub hätte demzufolge eine sehr stark erniedrigte Pufferkapazität verglichen mit reinem PZ-Mörtel, und sie wäre durch die elektrochemische Reaktion an der Anode sofort aufgebraucht. Silicastaubmodifizierter PZ-Mörtel soll daher nicht als Einbettmaterial verwendet werden.

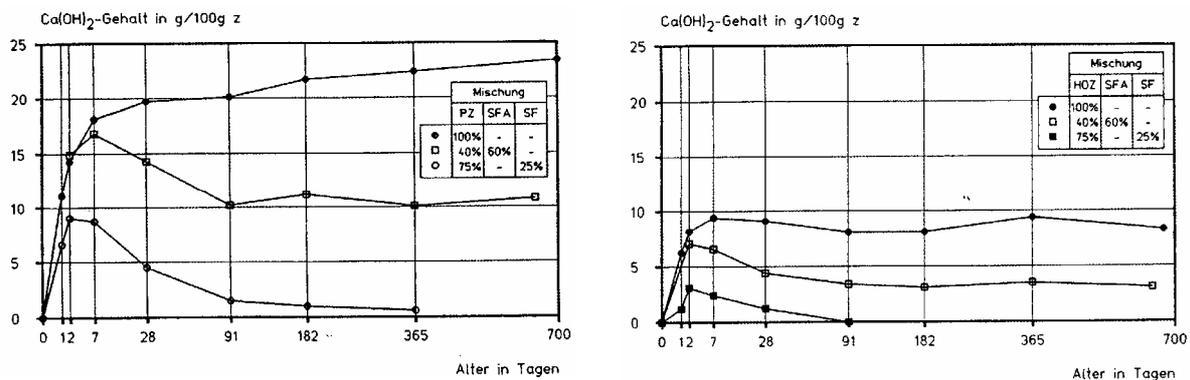


Abbildung 8: Entwicklung des Portlandit-Gehaltes mit der Zeit für Portlandzement (links) und Hochofenzement (rechts) mit verschiedenen Zusatzstoffen (aus [8]).

Die Pufferkapazität kann durch aufwendige Säuretitration, wie in Referenz [7] beschrieben, bestimmt werden. Kann davon ausgegangen werden, daß der Einbettmörtel nur Portlandzement enthält, so ist es auch möglich, die Pufferkapazität durch eine einfache Siebanalyse abzuschätzen (siehe Abbildung 9).

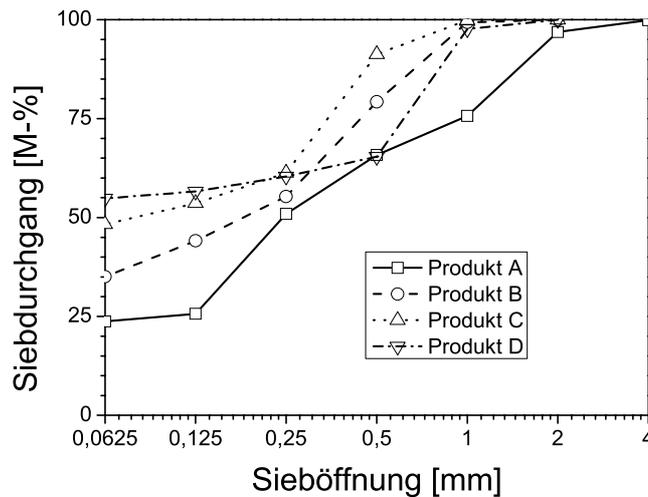


Abbildung 9: Siebanalyse von verschiedenen handelsüblichen Einbettmaterialien

Durch elektrochemische Potentialmessungen der Anode lässt sich feststellen, ob der anodische Bereich bereits angesäuert ist oder nicht. Da bei der elektrochemischen Reaktion an der MMO/Titan-Anode die Sauerstoffentwicklung gegenüber der Chlorentwicklung bevorzugt ist (sie erfolgt bei niedrigeren anodischen Potentialen, siehe Abbildung 10), bestimmt die Reaktion nach Formel 2 das Ausschaltpotential der Anode. Bei alkalischer Umgebung der Anode (pH = 9 – 12.5) liegt das Ausschaltpotential der Anode bei (theoretisch) +170 bis +350 mV gegen CSE, bei saurer Umgebung (pH = 1 – 3) jedoch bei (theoretisch) +730 bis +850 mV gegen CSE*. Nach einer bestimmten Zeit, abhängig von der angelegten Stromdichte, steigt das Ausschaltpotential der Anode an, was einer Ansäuerung des Anodenbereiches entspricht (siehe Abbildung 11).

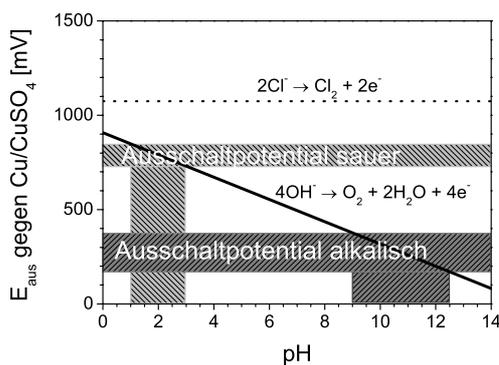


Abbildung 10: Ausschaltpotentiale für Anoden in alkalischer und saurer Umgebung

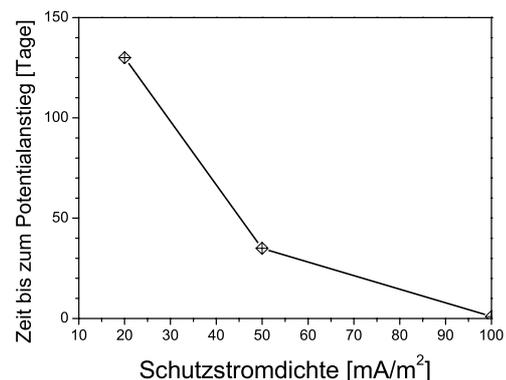


Abbildung 11: Zeitpunkt des Potentialanstieges der Anode bei unterschiedlicher Stromdichte und Umgebungsfeuchte = 70 % (aus Referenz [9])

* CSE "Copper Sulfate Electrode": Englische Bezeichnung für die Cu/CuSO₄-Referenzelektrode

Bei anodischer Ansäuerung steigt also das Ausschaltpotential der Anode gemäß Formel 2 an. Bei hohen Stromdichten erfolgt der Potentialanstieg nach kurzer Zeit, bei hinreichend niedrigen Stromdichten erst nach sehr, sehr langer Zeit. Der Verlauf der Ausschaltpotentiale für unterschiedliche Stromdichten ist in Abbildung 12 ersichtlich [9].

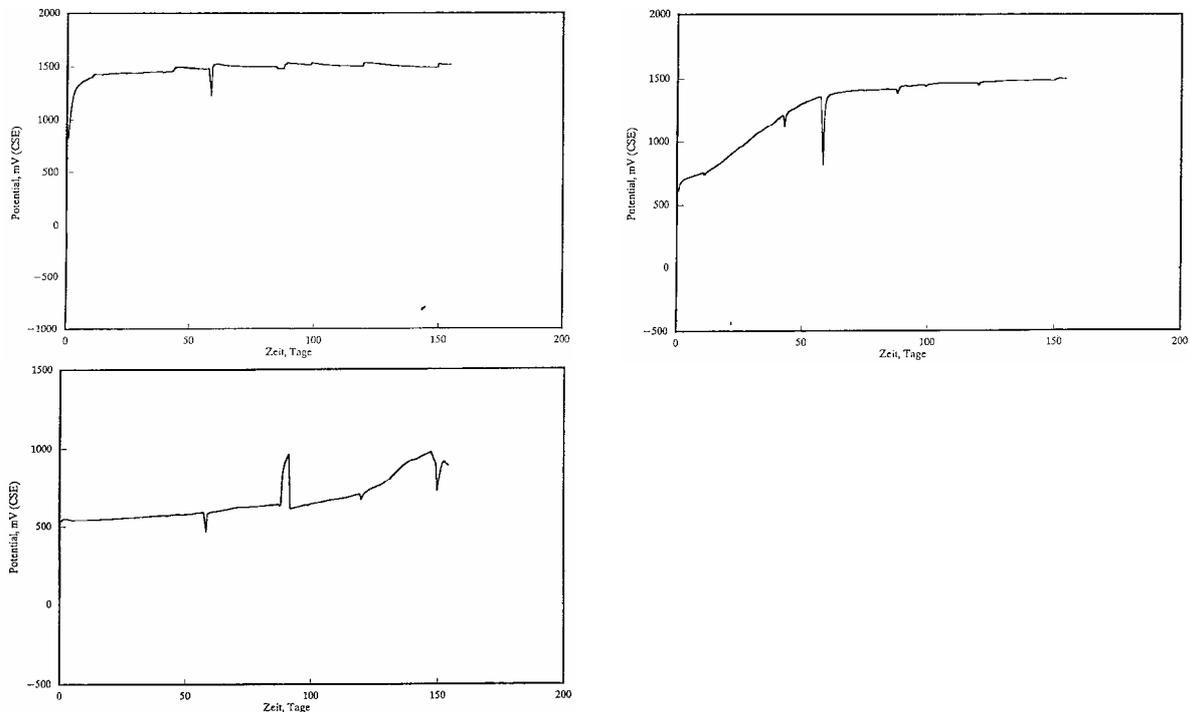


Abbildung 12: Anodischer Potential/Zeit-Verlauf für PZ-Mörtelproben. Links oben: $i = 200 \text{ mA/m}^2$; rechts oben: $i = 50 \text{ mA/m}^2$; links unten: $i = 20 \text{ mA/m}^2$ (aus [9]).

Diffusion und elektrischer Widerstand

Die Zeit, die vergeht bis die anodische Ansäuerung Auswirkungen am Potentialverhalten der Anode und letztlich an der Integrität des Betongefüges zeigt, ist nicht nur abhängig von der Pufferkapazität des Einbettmaterials und der angelegten Stromdichte, sondern auch vom Nachtransport der Hydroxylionen zur Anode. Dieser Transport erfolgt durch Diffusion. Die Diffusionskonstante – ein Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit – ist nun aber mit dem elektrolytischen Betonwiderstand gekoppelt: Je höher der Betonwiderstand, desto niedriger die Diffusionsgeschwindigkeit und vice versa. Mathematisch wird dieser Sachverhalt durch die Nernst-Einstein Beziehung beschrieben:

$$D = \frac{RT}{z^2 F^2} \cdot \lambda \quad \text{Gleichung 2}$$

- mit:
- D..... Diffusionskonstante [m^2/s]
 - R..... universale Gaskonstante ($8.3144 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 - T..... absolute Temperatur [K]
 - z..... Ionenwertigkeit
 - λ spezifische Leitfähigkeit für das diffundierende Ion [$\Omega^{-1}\text{mol}^{-1}\text{m}^2$]

Die spezifischen Leitfähigkeiten aller im Porenwasser vorhandenen Ionen bestimmen die Gesamtleitfähigkeit des Mörtels oder Betons (Kehrwert des Betonwiderstandes). Einen wesentlichen Anteil an der Betonleitfähigkeit tragen dabei die Hydroxylionen. Diese werden im elektrischen Feld durch Migration gemäß Gleichung 3 zur Anode hingezogen.

$$j_i = \frac{z_i F}{RT} D_i c_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit: j_i Ionenfluß der Ionentypen i [mol/m²s]
 D_i Diffusionskonstante für das Ion i [m²/s]
 c_i Konzentration des Ions i [mol/m³]
 z_i Wertigkeit des Ions i
 $\frac{\partial E}{\partial x}$ Elektrische Feldstärke [V/m]

Aus Gleichung 3 ist ersichtlich, daß andere Ionen ebenfalls im elektrischen Feld wandern. Besonders Chloridionen konkurrieren mit den Hydroxylionen in der Wanderung zur Anode hin.

Um die Leitfähigkeit des Einbettmaterials zu verbessern, soll daher keineswegs Salz zugesetzt werden!

Der Betonwiderstand ist auch sehr wesentlich abhängig von der Wassersättigung des Betons. Die Wassersättigung ist in erster Linie gegeben durch die Umgebungsfeuchte, aber auch durch die Porengrößenverteilung und durch den Gehalt an synthetischen Zusatzstoffen. Sehr deutlich ersichtlich ist die Bedeutung des Betonwiderstandes anhand von Abbildung 13. Einbettmaterialien mit niedrigem elektrischem Widerstand ermöglichen eine raschere Diffusion.

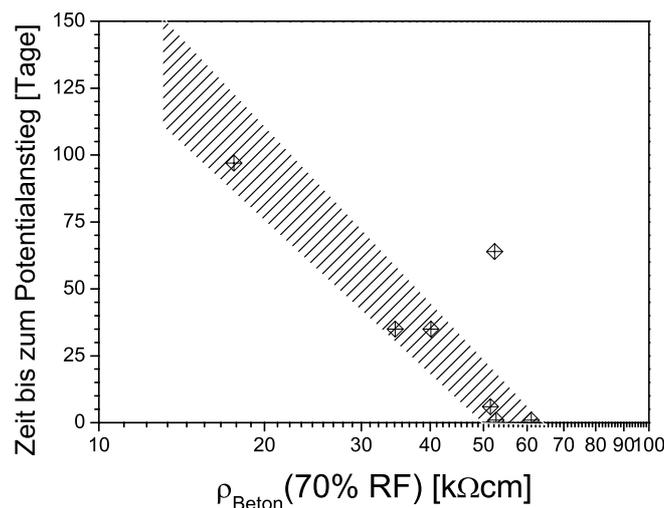


Abbildung 13: Zeitpunkt des Potentialanstieges der Anode als Funktion des Betonwiderstandes (Umgebungsfeuchte = 70 %. Schutzstromdichte = 50 mA/m², aus Referenz [9])

Vorzugsweise ist für Einbettmaterialien daher ein möglichst niedriger spezifischer Betonwiderstand anzustreben, damit eben die Nachdiffusion der Hydroxylionen zur Anode hin schnell genug erfolgen kann. Man kann also die Eignung der Einbettmaterialien durch deren Betonwiderstand charakterisieren.

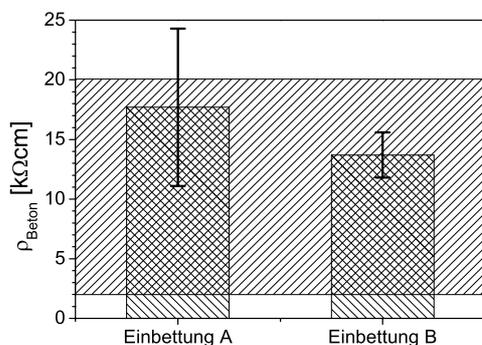
Messung des spezifischen Mörtelwiderstandes

Die Messung des spezifischen Mörtelwiderstandes ist mit einigen praktischen Schwierigkeiten verbunden. Einerseits ist es nötig verschiedene Materialien bei Standardumweltbedingungen zu messen, andererseits variieren die Umweltbedingungen im Feld so stark, daß der Wertevergleich bei Standardbedingungen oft nicht aussagekräftig ist.

Die Messung der Standardwerte für den Betonwiderstand erfolgt für gewöhnlich nach Lagerung von 28 Tagen im Wasser. Danach, so nimmt man an, ist die Betonprobe vollständig wassergesättigt.

Dem Autor sind zwar keine oberen und unteren Grenzwerte für den elektrischen Widerstand von Einbettmaterialien bekannt, sehr wohl aber gibt es Empfehlungen für Mörtel, mit welchen lokale Ausbesserungen vor Aufbringung der Anode vorgenommen werden. Für derartige Materialien soll der elektrische Betonwiderstand unter Standardbedingungen zwischen 2 kΩcm und 20 kΩcm betragen [10]. Ein niedriger Widerstand ist wichtig, um schutzbedürftige Bewehrung unterhalb (oder hinter) der Ausbesserung nicht elektrisch abzuschirmen. Für die optimale Stromverteilung ist zwar der Widerstand des Einbettmaterials nicht so eminent wichtig wie für Saniermörtel, jedoch ist aus Gründen der Diffusion ein niedriger elektrischer Widerstand des Einbettmaterials ebenfalls anzustreben.

Abbildung 14 zeigt die Widerstandswerte unter Standardbedingungen für zwei Einbettmassen, für einen Labormörtel mit PZ und für einen Fertigmörtel. Die Widerstandswerte differieren nicht stark, und liegen für eine KKS-Anwendung noch im akzeptablen Bereich.



Einbettung A: Labormörtel

Maximalkorn: 5 mm

Zementgehalt: 450 kg/m³

w/z: 0.4

Einbettung B: Fertigmörtel

Maximalkorn: 4 mm

Zementgehalt: hoch

w/z: niedrig

Abbildung 14: Standardwerte für den spezifischen Betonwiderstand (28 Tage Wassersättigung, 20 °C, von [9]).

In natura ist Beton variierender Umgebungsfeuchte ausgesetzt, nicht oft beträgt die Umgebungsfeuchte 100 % RF und nur selten ist Beton wassergesättigt. Betone und Mörtel zeigen nun - abhängig von ihrer Zusammensetzung - eine unterschiedliche Abhängigkeit des elektrolytischen Betonwiderstandes von der Umgebungsfeuchte. Für die beiden Einbettmaterialien aus Abbildung 14 ist die Abhängigkeit für Einbettung B von der Umgebungsfeuchte weniger stark ausgeprägt als für Einbettung A. Selbst bei relativ niedriger Umgebungsfeuchte liegt hier der spezifische Betonwiderstand noch bei niedrigen Werten. Die

anodische Ansäuerung wird bei Einbettung B praktisch doppelt so schnell durch Nachdiffusion von Hydroxylyonen aus dem Mörtelinneren kompensiert wie in Einbettung A.

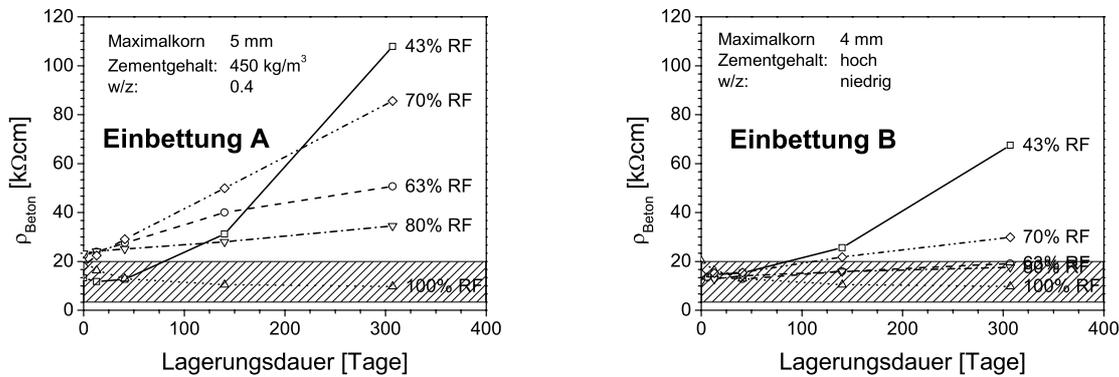


Abbildung 15: Entwicklung des spezifischen Betonwiderstandes für die beiden Einbettmassen A und B bei unterschiedlicher Umgebungsfeuchte.

Eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Abhängigkeit des Betonwiderstandes von der Umgebungsfeuchte kann durch die Porosität und die Porendurchmesserverteilung gegeben werden: Ein großer Gelporenanteil hält auch noch bei niedriger Außenfeuchte viel Wasser zurück, während Poren mit großem Durchmesser schon bei höherer Außenfeuchte austrocknen (beschrieben durch die Kelvin-Laplace Gleichung). Zementmörtel, welche also mit niedrigem W/Z-Wert hergestellt wurden, daher einen höheren Gelporenanteil haben, weisen bei niedriger Außenfeuchte höhere Leitfähigkeiten auf als Mörtel mit hohem W/Z-Wert siehe Abbildung 16 und Referenz [11])

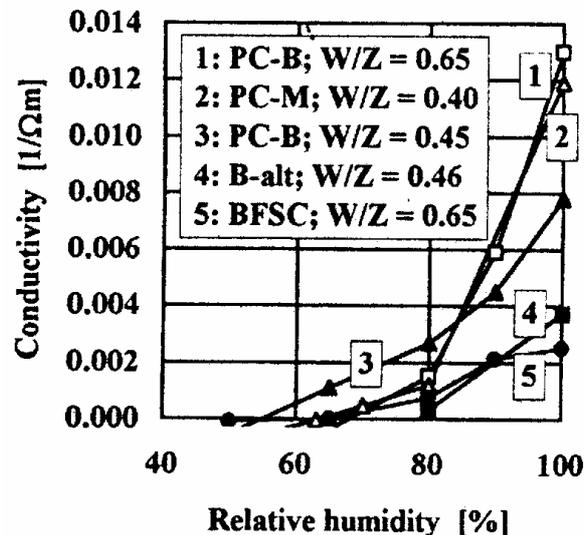


Abbildung 16: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Aussenfeuchte für verschiedene Beton- und Mörtelproben (PC-B: junger PZ-Beton, PC-M, junger PZ-Mörtel, B-alt: alter PZ-Beton, BFSC, Beton mit Hochofenschlacke; aus Referenz [11])

Die Diffusionsgeschwindigkeit der Hydroxylionen kann auch durch Kunststoffzusatz erniedrigt werden. Es wurde beobachtet, daß es bei kunststoffmodifizierten Mörteln eher zu Gefügestörungen rund um die Anode kam, als bei kunststofffreien Mörteln [9].

Schlußfolgerungen

Um bei kathodischen Korrosionsschutzanlagen den Verbund Anode/Einbettmörtel möglichst lange in optimaler Funktion zu erhalten sind folgende Punkte zu beachten.

1. Die Einbettmasse soll eine hohe alkalische Pufferkapazität aufweisen
2. Das Bindemittel der Einbettmasse soll gewöhnlicher Portlandzement sein und keine puzzolanischen Stoffe, welche den Portlanditgehalt der Zementmatrix verringern (wie z.B. Microsilica), enthalten.
3. Der Wasser-Zementwert der Einbettmasse soll niedrig sein, um ein Austrocknen bei niedriger Außenfeuchte zu vermeiden.
4. Die Einbettmasse soll keine, allenfalls möglichst niedrige Kunststoffzusätze aufweisen, um die Diffusion von Hydroxylionen nicht zu behindern.
5. Die Einbettmasse soll keine Chloride beinhalten.

Referenzen

- 1 R.F. Stratfull
Experimental Cathodic Protection of a Bridge Deck
California Department of Transportation, Report CA-DOT-TL-5117-4-74-02,
Sacramento, CA 95807, January 1974
- 2 G.H.C. Chang, J.A. Apostolos, F.A. Myhres,
Cathodic Protection Studies of Reinforced Concrete
California Department of Transportation, Report No. FHWA/CA/TL-81/02, March
1981
- 3 R.F. Stratfull
Criteria for the cathodic protection of bridge decks
in: "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction" ed. A.P. Crane, The Society
of Chemical Industry, Ellis Horwood Ltd, 1983 (ISBN 0-85312-600-3)
- 4 B.L. Martin, J.E. Bennett
*An Activated Titanium Mesh Anode for the Cathodic Protection of Reinforcing Steel in
Concrete*
CORROSION'87, Paper 147, San Francisco, California, March 9-13, 1987
- 5 D.M. Harriott, M. Laylor, J.P. Broomfield, A. Saccomano, K.B. Brosseau
*Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements: A State-of-the-Art
Report*
SHRP-S-337, Strategic Highway Research Program, National Research Council,
Washington, DC 1993

- 6 F. Hunkeler
Untersuchungen zum kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton im Tunnel San Bernardino
Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, Zürich, Oktober 1992
- 7 G.K. Glass, B. Reddy, N.R. Buenfeld
Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity
Corrosion Science, **42**, 1587-1598 (2000)
- 8 B. Meng, U. Wiens
Einfluß von Puzzolanen als Betonzusatzstoff auf die Alkalität der Porenlösung
4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Technische Akademie Esslingen, 17.-19. Dez. 1996
- 9 R.O Müller, K Holtzhauer
Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen
Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln
Bericht Nr. 231.6876/92.16, Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie Wildeg, August 1992
- 10 S.M. Soltesz
Cementitious materials for thin patches
Final Report
Report No.: FHWA-OR-DF-01-18, Oregon Department of Transportation Research Group, June 2001
- 11 F. Hunkeler
Monitoring of Repaired Reinforced Concrete Structures by Means of Resistivity Measurements
Materials Science Forum, **247**, 93-106 (1997)