

# **Kathodischer Korrosionsschutz für Stahlbeton**

**Sanierung und Erhaltung von Hafengebäuden aus Stahlbeton  
durch kathodischen Korrosionsschutz**

1. Auflage 1994

Hafenbautechnische Gesellschaft e.V.

Hamburg

Fachausschuß für Korrosionsfragen



## Vorwort

Der Fachausschuß für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. Hamburg, hat sich nach Beendigung seiner Arbeit zum Thema „Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau — KKS“ [1], seit 1990 folgerichtig mit dem kathodischen Schutz des Stahls im Stahlbeton (KKSB) befaßt.

Über dieses in Deutschland bisher nur wenig bekannte und noch weniger angewandte Verfahren existiert bereits eine Fülle von — meist ausländischer — Literatur. Der Ausschuß hatte es sich deshalb zur Aufgabe gemacht, das Schrifttum zu sichten und die vorliegenden Erkenntnisse allgemein verständlich, aber auch vertiefend, für die Hafentechniker und Wasserbaukollegen in einer Broschüre zusammenzufassen.

Nun, da es geschafft ist, sei an dieser Stelle allen Mitgliedern des Fachausschusses für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit und für ihre Beiträge zur Erarbeitung des vorliegenden Kompendiums gedankt.

Besonders zu nennen sind hier die Herren des Arbeitskreises „KKSB“, die seit 1991 in intensiver Zusammenarbeit auch in der Zeit zwischen den jährlich drei Arbeitssitzungen des Ausschusses die Hauptarbeit zu diesem Thema geleistet haben:

Dr. rer. nat. G. Binder, Karlsruhe  
Dipl.-Ing. P. Heiß, Hamburg  
Dipl.-Ing. F. Möhlmann, Essen  
Dipl.-Ing. H. Röder, Aumühle  
Dr.-Ing. M. Raupach, Aachen (als Gast).

Initiator dieser Broschüre und von Anfang an treibende Kraft war Herr Dipl.-Ing. P. Heiß, der nach Abschluß dieser Arbeit als „dienstältestes“ Mitglied aus Altersgründen aus dem Ausschuß ausscheidet. Ihm gilt der besondere Dank aller Ausschuß-Mitglieder, verbunden mit den besten Wünschen für weiteres Wohlergehen im verdienten Ruhestand.

Zum guten Gelingen haben auch die übrigen aktiven Mitglieder des Ausschusses beigetragen:

Dipl.-Ing. H. Jonetzki, Hamburg  
Ing. grad. R. Karius, Dortmund  
Laborleiter H. Lemke, Oldenburg (als Gast)

Dipl.-Ing. K. Lüpnitz, Wuppertal  
Dipl.-Wi.-Ing. D.-J. Minnasch, Hamburg  
Dipl.-Chem. M. Baumann, Berlin (als Gast).

Dank sagt der Ausschuß den Behörden, Firmen und Institutionen, die seine Arbeit durch die Möglichkeit zur Besichtigung interessanter Bauwerke und Anlagen, aber auch auf sonst vielfältige Weise unterstützt und gefördert haben.

Für die Bewältigung der zukünftigen Aufgaben zur Verbesserung des Korrosionsschutzes benötigt der Ausschuß auch weiterhin die Mitarbeit der Fachkollegen und die Unterstützung von außen einschließlich notwendiger (möglichst konstruktiver) Kritik.

Cuxhaven, im Juni 1994

Dipl.-Ing. Rust  
(Vorsitzender)



# Sanierung und Erhaltung von Hafenanlagen aus Stahlbeton durch kathodischen Korrosionsschutz in Beton

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Einleitung</b> .....	9
<b>1 Einführung und Grundlagen</b> .....	11
1.1 Elektrochemische Grundlagen der Stahlkorrosion im Beton .....	11
1.2 Elektrochemie und Korrosionswahrscheinlichkeit im Spiegel des Pourbaix-Diagramms .....	13
1.3 Risse im Stahlbeton und ihr Korrosionseinfluß .....	15
1.4 Karbonatisierung des Betons .....	16
1.5 Chloridinduzierte Korrosion .....	17
1.6 Elektrischer Mechanismus der Korrosionserscheinungen .....	21
1.7 Elektrolytische Eigenschaften des Betons .....	22
1.8 Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl im Beton .....	24
1.9 Korrosion und Korrosionsschutz im Spiegel einer elektrischen Ersatzschaltung .....	26
1.10 Indikationen für einen kathodischen Schutz im Stahlbeton .....	32
1.11 Instandsetzung und Vorbeugung durch kathodischen Schutz der Bewehrung .....	34
1.12 Instandsetzung mit betontechnologischen Maßnahmen .....	35
<b>2 Fachliche Voraussetzungen für die Anwendung des KKSB</b> .....	36
2.1 Nachweis der bautechnischen Eignung der Anodensysteme .....	36
2.2 Qualifikation der Betriebe des kathodischen Korrosionsschutzes .....	36
<b>3 Vorgehen bei Instandsetzung an bestehenden Bauwerken</b> .....	36
3.1 Durchführung der Schadensanalyse .....	36
3.2 Entscheidung über die Instandsetzung .....	43
3.3 Wirksamkeit des KKSB, Schutzpotential und Schutzkriterien .....	44
3.4 Festlegen der Systeme und der Schutzbereiche für den KKSB .....	54
3.5 Metallenleitende Durchverbindung der Stahlteile im Beton .....	55
3.6 Vorbereiten des schadhaften Betons .....	56
3.7 Einbau der Bezugselektroden (Referenzelektroden) .....	57
3.8 Einbau der Anoden und Aufbringen des Deckbetons .....	58
3.9 Zweckmäßige Stromquellen .....	59
3.10 Inbetriebnahme und Kontrolle .....	59
3.11 Kosten und Wirtschaftlichkeit .....	61
3.12 Beispiel einer Großanlage .....	62
<b>4 KKSB als Vorsorgemaßnahme für korrosionsgefährdete Neubauten</b> .....	66
4.1 Ausgangssituation und allgemeine Indikationen .....	66
4.2 Vorbereitung der Bewehrung, elektrische Installation .....	67
4.3 Einsatz der Anoden .....	67
4.4 Gütesicherung beim Einbringen des Betons .....	69
4.5 Wirksamkeit des KKSB, Schutzkriterien .....	70
4.6 Kosten und Wirtschaftlichkeit .....	71

<b>5</b>	<b>Interaktionen zwischen Stahlgründungselementen und Stahlbeton- überbau im Meerwasser</b> .....	72
5.1	Allgemeine Problemstellung .....	72
5.2	Problemstellung am Beispiel Übergang Spundwandkopf-Betonholm ..	74
5.2.1	Spundwand und Betonüberbau ungeschützt .....	74
5.2.2	Spundwand durch KKS geschützt, Betonüberbau ungeschützt .....	76
5.2.3	Spundwand durch KKS, Bewehrung durch KKSB geschützt .....	78
5.3	Maßnahmen und Vorsorge gegen Schäden .....	80
5.3.1	Neubauten .....	80
5.3.2	Instandsetzungen .....	82
<b>6</b>	<b>Schrifttum</b> .....	84

## Einleitung

Die vorliegende Broschüre befaßt sich mit dem kathodischen Korrosionsschutz der Bewehrung im Stahlbeton von Hafenanlagen. Die Notwendigkeit, dieses Thema einmal speziell zu behandeln, liegt einerseits im Auftreten zahlreicher Korrosionsschäden an Chloriden ausgesetzten Betonkonstruktionen des Hafenanbaues; andererseits ist der Umstand unbefriedigend, daß die in den letzten Jahren erschienenen deutschen Regelwerke für die Instandsetzung des durch Korrosion geschädigten Betons auf die Möglichkeiten des KKSB — speziell im Hafenanbau — nicht eingehen.

Weiter stellte sich heraus, daß die vorhandene Norm DIN 30 676/85 „Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz“ mit ihren Vorgaben (zum Beispiel Schutzpotential von  $-750 \text{ mV}/\text{Cu}^*$  für Stahl in Beton als einzuhaltender Grenzwert) nur bedingt anwendbar ist. Der Ausschuß hat Möglichkeiten aufgezeigt, dieses Kriterium für den Hafenanbau zu relativieren.

Als gesichert gilt, daß es in bestimmten, exponierten Lagen des Wasser- und Hafenanbaues mit Mitteln des *passiven Korrosionsschutzes* allein nicht möglich ist, den Betonstahl auf Dauer vor Korrosion zu schützen, zumal wenn eine hohe Lebensdauer erreicht werden soll. Liegt eine solche Indikation vor, so ist die Anwendung des *aktiven Korrosionsschutzes* KKSB eine verlässliche Methode, die Korrosion kontrolliert zu stoppen, beziehungsweise von Anfang an zu verhindern.

Gefährdet sind Verladebrücken, befahrbare Tunnel und Wehre, bei denen die Anwendung von Tausalzen nicht ausgeschlossen werden kann; Verladebrücken um so mehr, wenn Stein- und Kalisalze umgeschlagen werden. Gefährdet sind aber auch alle dem Wasser ausgesetzten Betonbauten im Wasserwechsel- und Spritzwasserbereich durch Anreicherung mit Chloriden.

Potentialmessungen, Bestimmung von Chloridkonzentrationen und Messung der Karbonatisierungstiefen werden zwar bei vielen größeren Betonsanierungen in vergleichenden Untersuchungen von Bauherren und Unternehmen ausgeführt. Die Verfahren des kathodischen Korrosionsschutzes werden aber in Deutschland nur selten angewendet.

Bei dem zumeist angewandten Prinzip des passiven Korrosionsschutzes sollen — nach dem Entfernen des Deckbetons — aufwendige neue Deckschichten den Zutritt von Wasser und Schadstoffen verhindern.

---

\*) vereinfachte Schreibweise für das relative Potential in mV, gemessen gegen die gesättigte  $\text{Cu}/\text{Cu SO}_4$ -Elektrode.

Die Chance der ständigen Überwachung mit gleichzeitiger Blockierung weiterer Stahlkorrosionen durch kathodischen Korrosionsschutz bleibt dadurch ungenutzt.

Im Übergangsbereich Spundwandkopf-Betonüberbau können vorwiegend im Spritzwasserbereich verstärkte Korrosionen mit charakteristischen Schäden an Stahl- und Betonteilen auftreten. Diese Schäden lassen sich durch KKS und/oder KKSB allein im allgemeinen nicht verhindern. Zusätzliche korrosionsschutzgerechte konstruktive Maßnahmen — zum Teil mit verstärktem passiven Schutz im Einbindungsbereich — müssen dazukommen. Ursachen und Lösungen für dieses Problem, welches häufig an Kaimauern in Nordseehäfen auftritt, werden im letzten Abschnitt aufgezeigt. Für die Ausführung bedarf es einer interdisziplinären Zusammenarbeit im frühen Stadium der Planung.

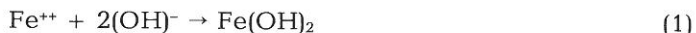
# 1 Einführung und Grundlagen

## 1.1 Elektrochemische Grundlagen der Stahlkorrosion im Beton

### a) Passivierung von Stahl in Beton

Stahl in Beton kann über Jahrzehnte vor Korrosion geschützt sein, wenn die unter den Bedingungen der Zementhydratation entstandene Passivierung der Stahloberfläche stabil bleibt. Die Passivierung besteht aus einer schützenden Oxidschicht, welche in Form eines dünnen, undurchdringlichen und für Ionen nichtleitenden Films eine weitere Korrosion im basischen Milieu der Hydratation verhindert. Die Herausbildung von Potentialdifferenzen im Bewehrungsstahl bleibt aus.

Gleichung (1) beschreibt die Entstehung des ersten passivierenden Korrosionsproduktes am Betonstahl:



Das Eisenhydroxyd  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  wirkt bei Sauerstoffzufuhr als Keim für das Anwachsen, beziehungsweise für eine Neubildung der Passivierung nach der Gleichung (2) an der Anode:



Der Vorgang der Eisenoxidbildung kann auch ohne externe Sauerstoffzufuhr — zum Beispiel im Unterwasserbereich — nach folgendem Schema ablaufen:



Die Deckschichten bleiben in der Umgebung eines intakten Betons stabil. Der pH-Wert liegt zwischen 12 und 14, eine Auflösung des Eisens findet nicht statt, eine lokale Korrosion kann zum Stillstand kommen.

### b) Depassivierung — Aufbau einer Korrosionszelle

Der Verlust der Passivierung wird durch Senkung des pH-Wertes im Beton (zum Beispiel durch Karbonatisierung) und/oder Erhöhung der Leitfähigkeit des Elektrolyten (zum Beispiel lokale Salzanreicherung im Porenwasser) eingeleitet. Infolgedessen entstehen Potentialdifferenzen am Bewehrungsstahl, welche den Korrosionsprozeß wieder in Gang setzen. Der Ablauf ist in Bild 1.1 dargestellt. Er läßt sich entsprechend den Gleichungen in zwei Teilprozesse gliedern:

die anodische Eisenoxidation und die kathodische Sauerstoffreduktion. Gemäß den Gleichungen (2) und (3) entstehen die Rostfolgeprodukte. Durch anhaltenden Sauerstofftransport zur Kathode bleibt die Korrosionszelle aktiv.

Die Folge der Korrosion ist ein Abtrag des effektiven Stahlquerschnittes bei gleichzeitiger Volumenvergrößerung durch die Korrosionsprodukte und die Gefahr der Sprengung des umgebenden Betons.

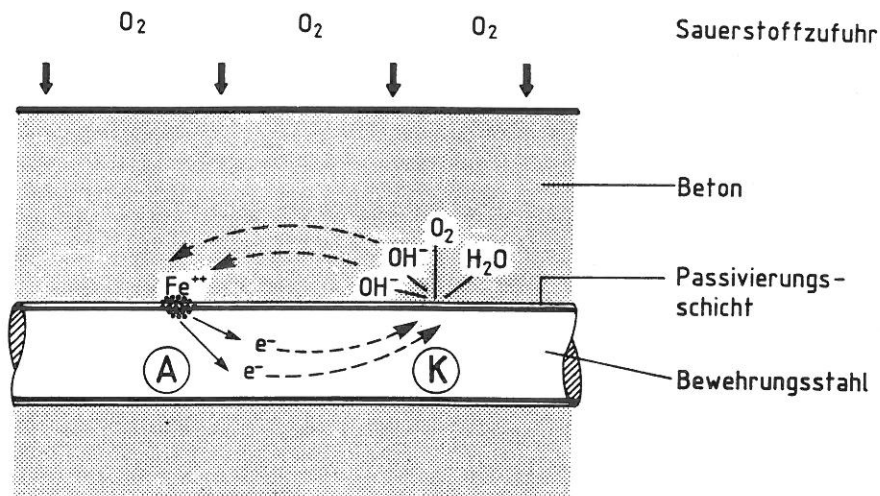
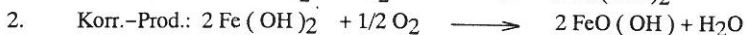
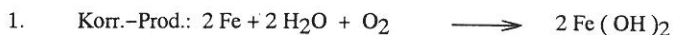
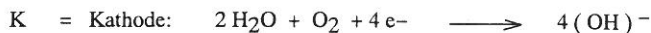


Bild 1.1 Korrosionszelle  
Schematischer Ablauf der elektrochemischen Stahlkorrosion



## 1.2 Elektrochemie und Korrosionswahrscheinlichkeit im Spiegel des Pourbaix-Diagramms\*

Eisen, wie die meisten Metalle, kann elektrochemisch korrodieren. Dabei laufen Reduktions- und Oxidationsprozesse ab. Diese werden zusammenfassend „Redox-Reaktionen“ genannt. Sie rufen Potentialänderungen hervor. Das Potentialgefälle zwischen Anode und Kathode ist der Motor der Korrosion.

Eisen und die meisten Metallionen reagieren mit den Hydroxyl-Ionen, in Abhängigkeit vom pH-Wert, zu festen Korrosionsprodukten. Aus diesen Abhängigkeiten läßt sich das Korrosionsverhalten zum Beispiel von Eisen in wässrigen Lösungen bei verschiedenen pH-Werten im Pourbaix-Diagramm darstellen.

Die Darstellung in Bild 1.2 wurde für die im Hafengebäude auftretenden Reaktionen vereinfacht:

Durch zwei diagonale, nach rechts abfallende parallele Linien ist das Stabilitätsfeld des Wassers umrissen, oberhalb wird Sauerstoff, unterhalb Wasserstoff gebildet.

Das große, schraffierte Feld ist der Bereich anodischer Eisenauflösung. Der Bewehrungsstahl ist noch nicht im Beton und ist zum Beispiel sauerstoffgesättigtem Regenwasser ausgesetzt, mit der Folge einer anodischen Auflösung. Der Stahl rostet (Position A). Sein Potential schwankt zwischen  $-400$  und  $-600$  mV/Cu. Nach dem Betonieren stellt sich, infolge der alkalisch reagierenden Zementphasen durch Schutzschichtbildung am Stahl im Beton, bei gleichzeitiger Erhöhung des pH-Wertes, ein positiveres Potential ein (Position B). Am eingebetteten Stahl bilden sich relativ stabile Eisenoxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), beziehungsweise Eisenhydroxide ( $\text{FeOOH}$ ) aus. Der stabile Bereich liegt zwischen pH 12 und pH 14. Durch Salzanreicherung im wässrigen Milieu erweitert sich im Pourbaix-Diagramm das Feld der Korrosion (gestricheltes Feld). Im Bereich der Betonschädigung erniedrigt sich der pH-Wert. Durch NaCl-Zutritt wird das Potential des Stahles zusätzlich abgesenkt.

Die Position B wandert dadurch in den korrosionsgefährdeten Bereich. Der Stahl beginnt zu rosten.

---

\*) Pourbaix, M.: Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions. London: Pergamon Press-Limited 1976

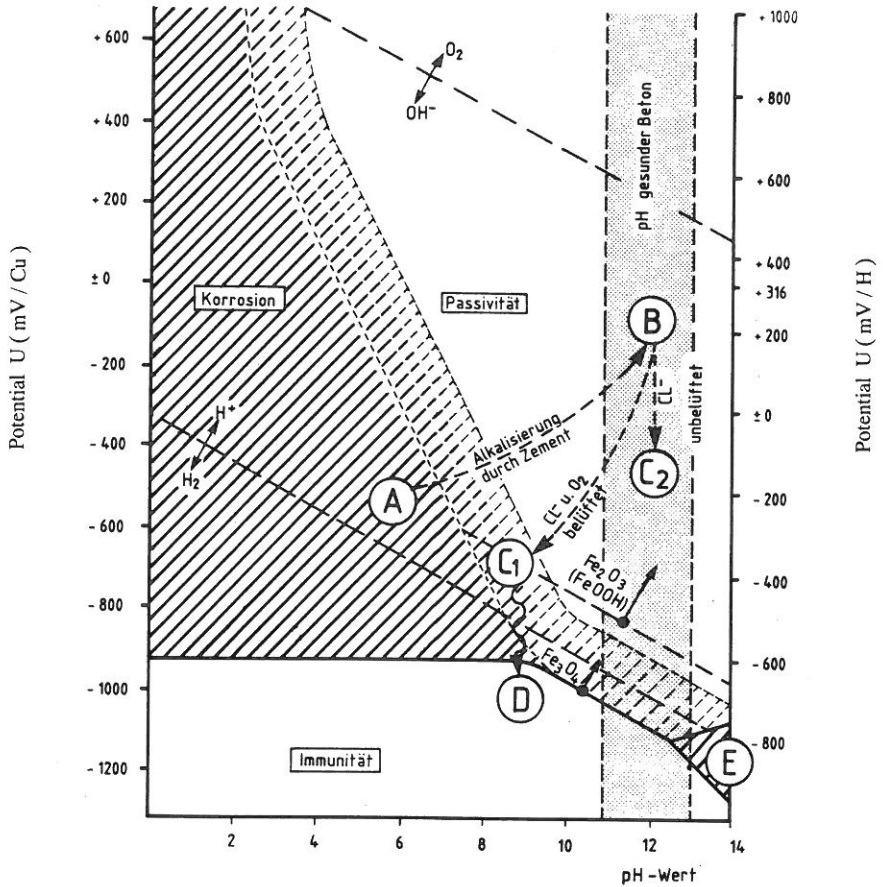


Bild 1.2 Die Korrosionswahrscheinlichkeit von Eisen im wässrigen Milieu in Abhängigkeit von Potential und pH-Wert. (Beispiel: Stahl im Stahlbeton)

Der durch Position C<sub>1</sub> gekennzeichnete Zustand stellt sich am Stahl zum Beispiel in der Spritzwasserzone von schadhaftem Beton ein.

Der durch Position C<sub>2</sub> gekennzeichnete Zustand stellt sich am Stahl im Unterwasserbeton ein. Der pH-Wert gegenüber Position B verändert sich nicht, das Potential wird jedoch um mindestens 300 mV negativer. Infolge unzureichender Sauerstoffzufuhr kommt es aber zu keiner Depassivierung, die Schutzschicht bleibt korrosionsstabil.



Aus dem durch Position D gekennzeichneten Zustand geht hervor, daß der Korrosionsprozeß, trotz abgefallenen pH-Wertes, gestoppt werden kann, wenn das Potential des Stahles durch Zuführung eines kathodischen Stromes soweit negativer gemacht wird, daß der Korrosionsstrom aufgehoben wird. Der so geschützte Stahl befindet sich im Bereich thermodynamischer Stabilität (im Bild „Immunität“), so lange ein genau dosierter kathodischer Strom fließt.

Der durch Position E gekennzeichnete Zustand veranschaulicht, daß es bei hohen kathodischen Strömen, trotz hoher Alkalität, zur Bildung von Ferraten ( $\text{FeO}_4^{2-}$ ) und Verlust der Immunität kommen kann (kathodische Korrosion). Bei Einhaltung der technischen Regeln des KKSB wird dies aber verhindert.

### 1.3 Risse im Stahlbeton und ihr Korrosionseinfluß

Der Korrosionsvorgang im Beton kann durch stets vorhandene Risse gefördert werden. Die Ribbildung im auf Biegung beanspruchten Stahlbeton mit ausgeprägter Biegezugzone ist in der Regel unvermeidlich (Biegerisse, Schubrisse), desgleichen die Ribbildung bei reiner mittiger Zugbelastung. Die theoretischen Ribbreiten in Abhängigkeit von der Stahlspannung sind berechenbar. Sie werden auch durch die Stabdurchmesser, die Betonüberdeckung und die Art der Beanspruchung beeinflusst (zum Beispiel Wellenschlag, extreme Wasserstände). Diese Art Risse reichen bis an den Betonstahl.

Die ersten Risse entstehen regelmäßig schon bei der Herstellung des Bauwerkes, beziehungsweise in den ersten Monaten danach. Sie können zum Beispiel durch Setzen des Frischbetons, Schwinden, Abfließen der Hydrationswärme (häufigste Ursache!) ausgelöst werden. Sie lassen sich nicht vorausberechnen, wohl aber durch die Wahl geeigneter Rezepturen der Betonmischung, das Einbringen, die Verdichtung und die Nachbehandlung des Betons beeinflussen.

Darüber hinaus treten aber auch Risse aus folgenden Ursachen auf:

- äußere Temperatureinwirkung
- Änderung der Lagerbedingung
- Schiffstoß
- Sprengrisse durch Frost (zum Beispiel in Hohlräumen)

- Risse durch Treibspannungen
- Risse durch Volumenvergrößerung der Korrosionsprodukte über oder unter der Bewehrung (zum Beispiel an Deckenuntersichten)

Korrosionsrisse können in jedem auch anders entstandenen Riß ihren Ausgang nehmen, wenn er nur groß genug und der Korrosion förderlich ist. Jede Schwachstelle in der Zugfestigkeit des Betongefüges kann den Rißverlauf beeinflussen. Risse im Beton, deren Breite 0,3 bis 0,4 mm nicht überschreitet, führen nicht zwangsläufig zu fortschreitender Korrosion. Eine zunächst aufgetretene lokale Depassivierung kann im alkalischen Milieu wieder rückgängig gemacht werden und die Korrosion kommt zum Stillstand.

#### 1.4 Karbonatisierung des Betons

Kohlendioxid der Luft kann sich mit dem Kalkhydrat aus den Poren des Betons zu Kalziumkarbonat verbinden.

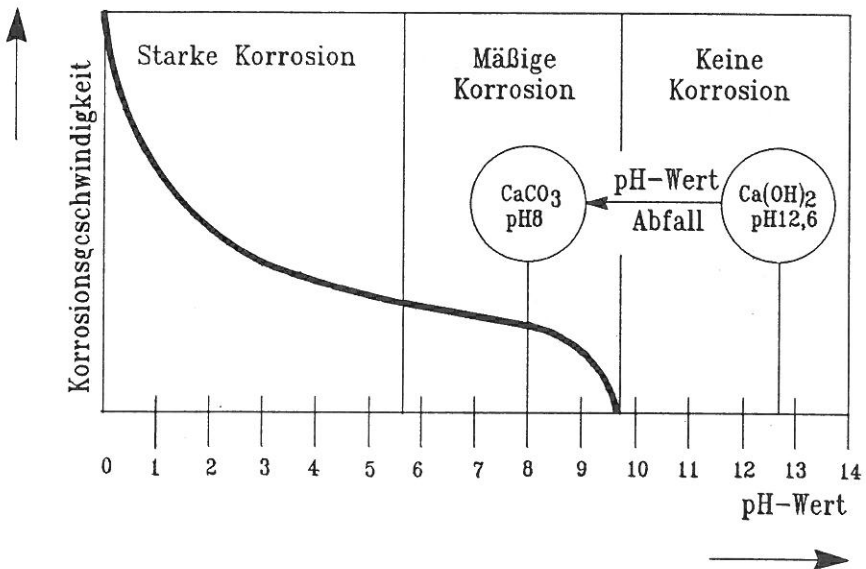


Bild 1.3 Karbonatisierung und Stahlkorrosion  
Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom pH-Wert bei Fehlen von ungebundenen Chloriden

Die Umsetzung ist irreversibel und hält an, auch wenn das bei der Hydratation entstandene Kalziumhydroxid verbraucht ist: Durch Hydrolyse der im Zementstein gebundenen Kalksilikathydrate wird ständig neues gelöstes Kalkhydrat in die Porenflüssigkeit nachgeliefert und bei Zutritt von Kohlensäure karbonatisiert. Die Karbonatisierung hat für die Betoneigenschaften verschieden gerichtete Auswirkungen:

- Verringerung oder Erhöhung der Porosität je nach Zementtyp
- allgemeine Festigkeitssteigerung je nach Zementtyp
- Reduzierung der Bindekapazität von Chlorionen
- Senkung des pH-Wertes in der Porenlösung.

Mit dem Verlust des basischen Milieus verliert der Bewehrungsstahl seine schützende Umgebung (Bild 1.3).

Folgende Einflußfaktoren beschleunigen den Karbonatisierungsvorgang:

- $\text{CO}_2$ -Gehalt der umgebenden Luft (Atmosphäre: 0,30 M-%, verbrauchte Luft: 21 M-%)
- geringe Betondichte (zum Beispiel Gasbeton!)
- Luftfeuchtigkeit von 50–70 % rel.
- Porosität (hoher Wasser-Zement-Wert)
- Ribßbildung (vergleiche Abschnitt 1.3)
- geringe Pufferkapazität mangels Alkali-Reserve.

## 1.5 Chloridinduzierte Korrosion

### a) Chlorideintrag

Chloride werden primär über das Anmachwasser, salzhaltige Zuschläge und durch Abbindebeschleuniger (zum Beispiel  $\text{MgCl}_2$ ) in den Beton eingebracht. Mit einer zusätzlichen Anreicherung von ungebundenen Chloriden muß bei Salzschlamm und bei Einsatz von Tausalzen auf befahrbaren Anlagen gerechnet werden. Dies gilt auch an Betonbauwerken im Meer- und Brackwasser sowie salzhaltigen Binnengewässern. Die Anreicherung mit Chloriden im Beton wird dabei besonders durch Wechsel von Feuchte und Austrocknung begünstigt.

Bei Bränden von PVC-haltigen Materialien, zum Beispiel auf dem Kai, kann in Verbindung mit Löschwasser Salzsäure entstehen. Bevorzugte Schadstellen liegen generell an zu geringen Betondeckungen sowie an Arbeitsfugen und Rissen, wobei mit örtlichen Anreicherungen zu rechnen ist (Bild 1.4).

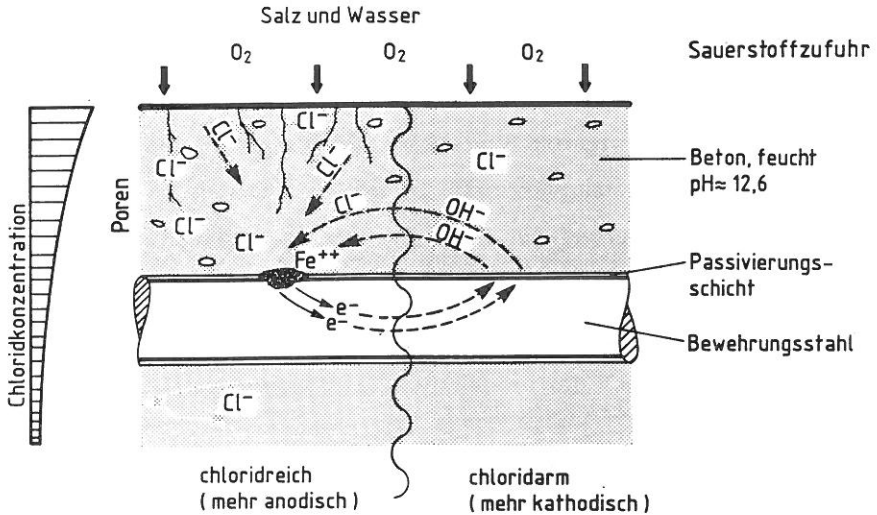


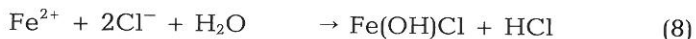
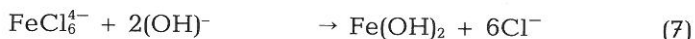
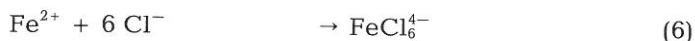
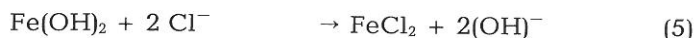
Bild 1.4 Korrosionsangriff der Chloridionen am Stahl im Beton

## b) Angriffsmechanismus

Die Wirkung des Chlorideintrags in Stahlbeton ist mit den Eigenschaften des Chlorions zu erklären. Bei hohen Chloridgehalten kann bereits die Eisenhydroxidausfällung und damit die Ausbildung eines Passivierungsfilms verhindert werden, indem sich leichtlösliches Eisenchlorid bildet (Gleichung [5]).

Chloride lagern sich bevorzugt an passivierenden Verbindungen an, können gleichzeitig Oxidfilme durchdringen und dabei eine direkte Oxidation von Eisen bewirken, beziehungsweise leichtbewegliche Eisenkomplexe bilden (Gleichung [6]). Chlorionen werden hierbei nicht verbraucht, sondern stehen für weitere Lösungsvorgänge entsprechend Gleichung (7) wieder zur Verfügung (katalytische Eigenschaft!). Die Hydrolyse (chemische Spaltung

unter Mitwirkung von Wasser) von Eisenchlorid kann durch die Salzsäureproduktion (Gleichung [8]) den pH-Wert lokal drastisch senken und die Eisenauflösung beschleunigen.



Unter dem Gesichtspunkt der Elektrochemie ist noch anzumerken, daß die Anwesenheit von gelösten Chloriden generell die Leitfähigkeit des Elektrolyten (Porenwasser) erhöht und damit auch die Transportgeschwindigkeit von Anode zur Kathode. Bei Anwesenheit von Sauerstoff wird somit der Umsatz der Korrosionszelle gemäß Bild 1.1 gefördert und die Rostbildung beschleunigt.

### c) Chloridbindungen — Kritischer Chloridgehalt

Bei der Hydratation des Zementes können die sich bildenden Kalksilikathydrate (zum Beispiel  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) freie Chloride adsorptiv binden. Die Trikalziumaluminatphase ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) des Zementes kann hingegen vermehrt Chlorionen einbauen unter Bildung des relativ stabilen Friedelschen Salzes ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). Bei erhöhten Chloridgehalten wird vorrangig Trichlorhydrat ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) gebildet, welches aufgrund seiner Instabilität (wasserlöslich) wieder zerfällt und Chlorid freisetzt. Nach Untersuchungen von Richartz [2] liegt hierfür die kritische Chloridkonzentration in der Lösung bei 1 M-%. Von daher läßt sich das sogenannte Richartz-Kriterium für den eingebrachten Gehalt an Chlor-Ionen bei einem Wasser-Zement-Wert von 0,4 mit einem Grenzwert von 0,4 M-%, bezogen auf das Zementgewicht, angeben (für Spannbeton sehen die Regelwerke einen entsprechenden Grenzwert von 0,2 M-% Cl vor).

Die Stabilität des Friedelschen Salzes wird durch pH-Wert-Senkung sowie durch Karbonat- und Sulfatanreicherung beeinträchtigt: Kohlendioxidzufuhr zersetzt das Friedelsche Salz durch Umwandlung in Hydrargillit ( $\text{Al}[\text{OH}]_3$ ), Kalzit ( $\text{CaCO}_3$ ) und Chlorid.

Die Erhöhung des Sulfatgehaltes — zum Beispiel durch Schwefeldioxyd-Immissionen — läßt Ettringit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), unter Freisetzung von Chlorid, entstehen.

In der Literatur wird vielfach auf einen kritischen freien Chloridgehalt verwiesen. Als gesichert gilt, daß sich bei Anwesenheit von freien Chloriden die Korrosionsraten von Stahl dramatisch erhöhen (siehe Bild 1.5). Chloridschwellenwerte in basischen Lösungen, entsprechend dem Porenwasser in Beton, haben Hausmann [3], sowie Gouda & Halaka [4] erarbeitet. Rechenberger [5] weist jedoch darauf hin, daß bei einem pH-Wert von 13 bereits wesentlich geringere Chloridkonzentrationen am Stahl Korrosion hervorrufen. Neben den genannten Abweichungen in den Kriterien besteht die Schwierigkeit bei chloridverseuchten Bauwerken darin, eine chemisch-analytische Unterscheidung von gebundenen und freien Chloriden zweifelsfrei zu gewährleisten [6].

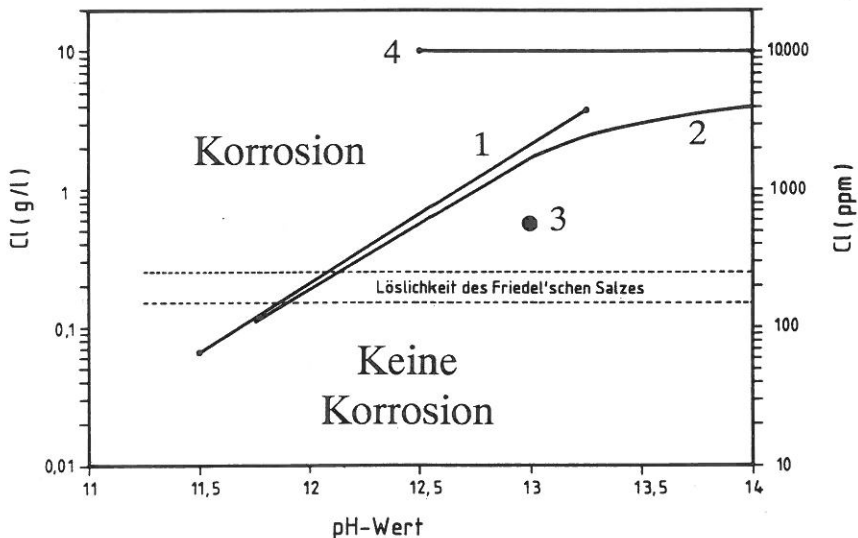


Bild 1.5 Schwellenwerte für Konzentrationen an freien Chloriden im wässrigen alkalischen Milieu

- 1: Hausmann-Kriterium ( $\text{mol Cl} \approx \text{mol OH} \times 0,6$ )
- 2: Kriterium nach Gouda & Halaka
- 3: Stahlkorrosion nach Rechenberger
- 4: Richartz-Kriterium

## 1.6 Elektrischer Mechanismus der Korrosionserscheinungen

Mit Hilfe der Korrosionszelle nach Bild 1.1 lassen sich die verschiedenen Erscheinungsformen der Korrosion durch elektrische Abläufe deuten:

### a) Flächenabtrag durch Mikrozellen

Bei großflächigem Verlust der Passivierung entstehen auf der aktiven Oberfläche der Bewehrung eine Vielzahl kleinster Lokalelemente, die Mikrozellen. Jedes Flächenelement ist im zeitlichen Wechsel sowohl Anode als auch Kathode; Kathoden und Anoden sind örtlich nicht getrennt.

Ist die Strombilanz ausgeglichen, d. h. tritt in jedem Lokalelement bzw. Flächenelement die gleiche anodische wie kathodische Stromdichte auf, gilt somit überall

$$i_A = i_K$$

erfolgt der Korrosionsangriff *ebenmäßig* auf der aktivierten Bewehrungsfläche.

Ist die Strombilanz über nicht zu kleine Flächen ausgeglichen, d. h. treten in den einzelnen Lokalelementen nur wenig voneinander abweichende Stromdichten auf und gilt über die betrachtete Fläche

$$\Sigma i_A = \Sigma i_K$$

erfolgt der Korrosionsangriff im wesentlichen *ebenmäßig* bis hin zu leichter *Narben- und Muldenbildung*.

Derartige Korrosionserscheinungen treten besonders an Bewehrungsstählen in karbonatisierten Betonbereichen und an freiliegenden, der Atmosphäre ausgesetzten und mit einem Feuchtigkeitfilm benetzten Stahloberflächen (Eigenkorrosion) auf.

### b) Örtlicher Abtrag durch Makrozellen

Bei örtlichem Verlust der Passivierung trennen sich räumlich die kathodisch und anodisch reagierenden Bereiche. Es entsteht ein galvanisches Element, das sich den auf den aktiven Flächen weiterarbeitenden Mikroelementen überlagert. Die Strombilanz ist nicht mehr ausgeglichen, es fließt eine Elementstrom

$$i_A - i_K = i_{EL}$$

Der Korrosionsangriff erfolgt *örtlich*, mit muldenförmigem bis *krater- oder lochförmigem* Abtrag, sogenannten Pittings.

Derartige Korrosionserscheinungen unter Bildung galvanischer Elemente (Makrozellen) treten bei hohen, aber unterschiedlichen Chloridkonzentrationen (Konzentrationselement), aber auch bei unterschiedlichen Durchfeuchtungen und Belüftungen (Belüftungselement) auf. Die korrosiven Wirkungen dieser Makrozellen sind meist erheblich größer und gefährlicher als die Wirkungen der Mikroelemente.

### 1.7 Elektrolytische Eigenschaften des Betons

Während die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten der Elektrolyte Meerwasser und Süßwasser bei 37.000 bzw.  $370 \mu\text{S}/\text{cm}$  liegen, erreichen die Leitfähigkeiten im Beton nur Werte zwischen 50 und  $0,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Das entspricht einem spezifischen Widerstand von 2 bis  $200 \text{k}\Omega/\text{cm}$ . Bei Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes im Beton liegt aber der grundsätzliche Unterschied der Elektrolyte Meerwasser und Betonporenwasser in der Verfügbarkeit des für die Korrosion erforderlichen Wassers:

- a) Meerwasser benetzt den Stahl:  
Leitfähigkeit ist gegeben,  
Korrosion findet statt.
- b) Meerwasser benetzt den Stahl nicht:  
Leitfähigkeit ist nicht vorhanden,  
Korrosion findet nicht statt.
- c) Betonporenwasser benetzt und umschließt den Stahl:  
Leitfähigkeit ist stets gegeben.  
Ob Korrosion stattfindet, hängt vom Maß der Leitfähigkeit und der Diffusion ab.

Die Leitfähigkeiten im Beton unterliegen großen Schwankungen, die von folgenden Faktoren beeinflusst werden:

- Feuchtegehalt
- Zementart
- Wasser-Zement-Wert
- sonstigen Komponenten des Betons
- eingewanderten Cloriden

Den stärksten Einfluß auf die Leitfähigkeit bzw. den ihr reziproken elektrischen Widerstand hat der Feuchtegehalt bzw. der Grad der Wassersättigung des Betons. Bei 40 % relativer Feuchte wird der spezifische Widerstand mehr als  $100 \text{k}\Omega/\text{cm}$



betragen, bei Wassersättigung kann er auf etwa  $5 \text{ k}\Omega/\text{cm}$  abfallen. Bei Einlagerung von Chloriden können die Widerstände nochmals erheblich abnehmen.

Wesentlich ist, daß die Leitfähigkeit innerhalb eines definierten Querschnitts des Betons stark variieren kann, wobei die Verteilung der meist später eingedrungenen Salze von großem Einfluß ist. Diese lokalen Unterschiede machen die Messung und die korrosionsrelevante Deutung des spezifischen Widerstandes am Objekt schwierig; auch Tiefenlage, Anzahl und Durchmesser der Bewehrungsstähe können die Meßwerte beeinflussen und erheblich verfälschen.

Wichtig für das Korrosionsgeschehen ist, daß der „Elektrolyt Beton“ (Betonporenwasser) eine ausreichende Ionenleitfähigkeit aufweist und damit merkbare Korrosionsvorgänge aufrechterhalten bleiben. Schätzt man ab, daß der spezifische Widerstand dazu 20 bis  $25 \text{ k}\Omega/\text{cm}$  nicht überschreiten darf, sind dazu, je nach Chloridgehalt, relative Betonfeuchten von mehr als 50 bzw. 60 % erforderlich. Diese Wassergehalte sind aber in Bauteilen im Freien wohl immer vorhanden, ganz sicher aber in den dem Meerwasser ausgesetzten Betonbauwerken des Hafengebäudes. Die Unterbindung der Korrosion durch „Austrocknen“ der Betonbauteile im Freien ist daher nicht möglich. Dies kann nur in sehr trockenen Innenräumen zum Erfolg führen.

Eine weitere Voraussetzung zur Aufrechterhaltung der Stahlkorrosion im Beton ist die Anwesenheit von Sauerstoff an der Oberfläche der Bewehrung. Dieser Sauerstoff diffundiert durch den Beton zum Stahl.

Die Gasdiffusion ist am stärksten abhängig von

- dem Wassergehalt bzw. der relativen Feuchte des Betons, ferner abhängig von
- der Dicke der Betondeckung
- der Porosität, die wiederum abhängt vom Wasser-Zement-Wert
- der Zementart
- Art und Gehalt an Zusatzstoffen.

In wassergesättigtem Beton sinkt die Sauerstoffdiffusion auf etwa ein Hundertstel des Wertes ab, der sich bei den häufig vorkommenden relativen Feuchten zwischen 70 und 80 % einstellt.

Die elektrolytischen Eigenschaften des Betons, sein Verhalten, einen einmal begonnenen Korrosionsvorgang zu beeinflussen, werden somit überwiegend von der relativen Feuchte des Betons bestimmt:

	Trockenes Milieu	Korrosives Milieu	Wassergesättigtes M.
Relative Feuchte	< 60 %	65 bis 98 %	> 98 %
Diffusion	MAX	ausreichend	MIN
Leitfähigkeit	MIN	ausreichend	MAX
Korrosion	vernachlässigbar	möglich	sehr gering

Korrosionsvorgänge an intakten Bauteilen im Freien sind also nur wahrscheinlich bei einer ziemlich hohen relativen Feuchte des Betons, etwa oberhalb von 65 bis 70 %. Durch hochwertige Betone mit niedrigem Wasser-Zement-Wert und durch hohe Betondeckung kann dieser Gefährdungsbereich noch auf Werte oberhalb von 70 bis 75 % angehoben werden. Bei Wassersättigung geht die Korrosionswahrscheinlichkeit mangels ausreichendem Sauerstoffangebot auf praktisch vernachlässigbare Werte zurück. Ständig eingetauchter Stahlbeton ist somit nicht gefährdet.

## 1.8 Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl im Beton

Das elektrochemische System der Betonstahlkorrosion wird durch einen justierbaren, ununterbrochen wirksamen Schutzstrom und durch außerhalb der Bewehrung in den Beton gebettete Anoden so beeinflusst, daß der Betonstahl kathodisch bleibt und vor weiterer Korrosion geschützt ist, solange der Strom fließt (siehe Bild 1.6).

Eine Gleichstromquelle, welche mit dem Plus-Pol an einer zusätzlichen Anode im Beton und mit dem Minus-Pol an die metallleitend durchverbundene Bewehrung angeschlossen ist, erzeugt einen Stromfluß, der dem Stromfluß der Korrosion entgegengesetzt ist. Am Bewehrungsstahl wird auf diese Weise ein Elektronenüberschuß erzeugt, so daß die freiwerdenden, beim anodischen Teilschritt am Stahl entstehenden Elektronen nicht mehr abgegeben werden können. Der Schutzstrom blockiert den Korrosionsstrom. Das Maß dieser Zurückdrängung wird durch den Stromfluß bestimmt. Die

Größe des Schutzstromes muß für jeden Teilbereich des gefährdeten Betonstahls aufgrund seines Zustandes und seiner voraussichtlichen weiteren korrosiven Beanspruchung abgeschätzt und so eingestellt werden, daß die vorgesehene Lebensdauer erreicht wird.

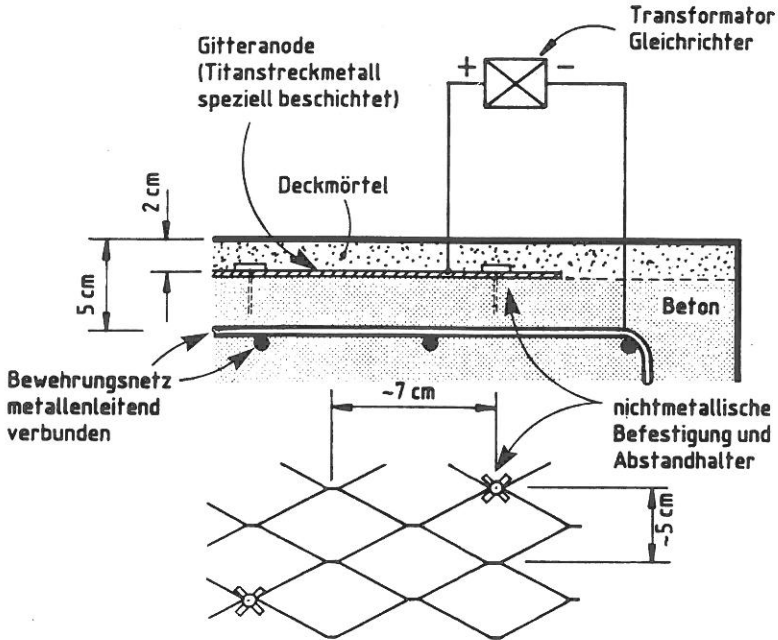
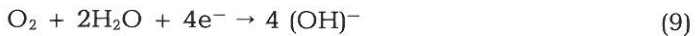


Bild 1.6 Beispiel eines kathodischen Korrosionsschutzes mit Anodengitter

Bei eingeschalteter Korrosionsschutzanlage laufen am geschützten Stahl — der *Kathode* des Systems — zwei alternative Reaktionen ab:

- a) Entweder bei ausreichendem Sauerstoffangebot durch gute Belüftung

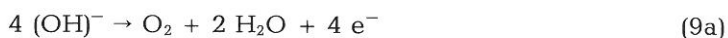


- b) oder bei Sauerstoffmangel, z. B. im Unterwasserbereich (und dadurch bedingtem mindestens 300 mV negativerem Potential), unter Wasserstoffbildung



Der gebildete Wasserstoff diffundiert durch den Beton nach außen.

Die an der Kathode erzeugten Hydroxylionen werden zur Anode gesaugt und dort unter Sauerstoffbildung entladen:



Um einer Wasserstoffentwicklung an der Kathode nach Gleichung (10) vorzubeugen, wird in der Praxis das Kathodenpotential auf  $-1.100 \text{ mV/Cu}$  begrenzt, die kathodische Reaktion entspricht dann Gleichung (9). Damit läuft der Betrieb mit ausreichender Sicherheit unterhalb der Zersetzungsspannung des Wassers, ein sogenannter Überschutz wird vermieden.

Im Bereich der Kathode stellt sich eine allmähliche Realkalisierung ein. Im gleichen Maße wird der Stahl passiviert. Im Bereich der Anode findet eine Ansäuerung statt, welcher der gewählte Anodenwerkstoff für die Lebensdauer des Bauwerks standhalten muß. Der Beton und der aufgebrachte Reparaturmörtel müssen eine ausreichende Diffusionsfähigkeit aufweisen, um das Ausgasen von Sauerstoff und eventuell von Wasserstoff zu ermöglichen. Chlorionen wandern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zur Anode, wo sie möglicherweise zu Chlorgas oxidiert werden könnten. Durch die chemische Reaktion mit dem Sauerstoff des Porenwassers entsteht jedoch, unter Disproportionierung, Chlorid und Hypochlorit. Oberflächenanstriche, die das Austreten entstehender Gase behindern, können den Betrieb einer KKSB-Anlage unmöglich machen.

## 1.9 Korrosion und Korrosionsschutz im Spiegel einer elektrischen Ersatzschaltung

Die vorstehend beschriebenen theoretischen Grundlagen der Korrosionserscheinungen sind vorwiegend elektrischer bzw. elektrochemischer Art. Es liegt daher nahe, ein elektrisches Ersatzschaltbild für die Korrosionszelle entsprechend Bild 1.1 aufzustellen, mit dem die Vorgänge qualitativ leicht beschreibbar sind (siehe Bild 1.7).

Unter der immer gegebenen Voraussetzung, daß der Widerstand der Elektronenleitung im Stahl  $R_{\text{St}}$  gegenüber den Widerständen der Ionenleitung zu vernachlässigen ist, können die unterschiedlichen Potentiale von anodischen und kathodischen Bereichen der Stahloberfläche als widerstandslose elektrische Spannungsquellen mit den einander entgegengesetzten elektromotorischen Spannungen  $U_A$  und  $U_K$

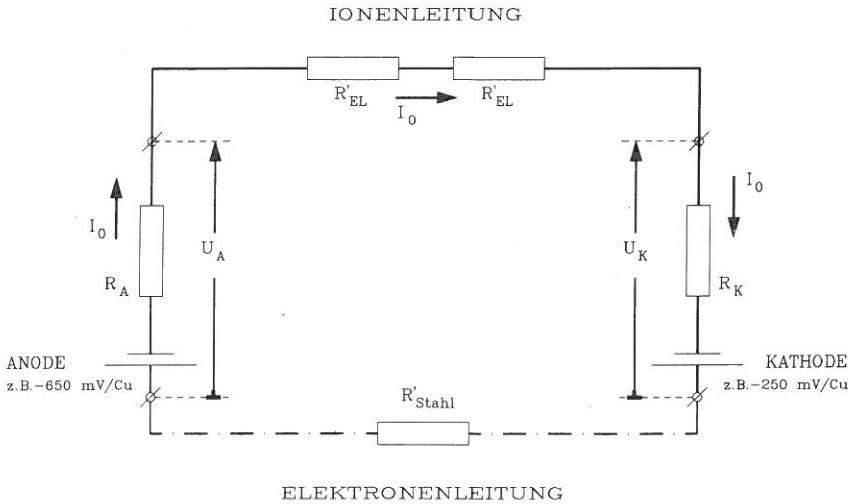


Bild 1.7 Elektrisches Ersatzschaltbild der Korrosionszelle

aufgefaßt werden. Ihre im Stromkreis wirksame Spannungsdifferenz wird an den Teilwiderständen  $R_A + R_{EL} + R_K$  verbraucht. Dann beschreibt:

- $R_A$  den Prozeß der anodischen Reaktion,  
d. h. die Auflösung von Eisen zu Eisenionen,
- $R_K$  den Prozeß der kathodischen Reaktion,  
d. h. die Reduktion von Sauerstoff zu Hydroxilionen,
- $R_{EL}$  den elektrolytischen Prozeß  
d. h. die Transportbedingungen der Ionen im Porenwasser.

Es gilt demnach

$$U_A - U_K = I_0 (R_A + R_{EL} + R_K)$$

Die Korrosionsgeschwindigkeit entspricht dem fließenden Strom:

$$I_0 = \frac{U_A - U_K}{R_A + R_{EL} + R_K}$$

Konstruktive und umgebungsbedingte Einflüsse bestimmen die Größe der einzelnen Faktoren und damit auch das Korrosionsgeschehen. Leider sind diese Faktoren keine Konstanten, sondern teilweise voneinander und auch vom Strom selbst abhängig. Dennoch ist eine qualitative Beschreibung möglich:

Von *anodischer Steuerung* sprechen wir, wenn die anodische Teilreaktion die bestimmende Größe ist, also wenn  $R_K$  und  $R_{EL}$  klein gegen  $R_A$  sind. Das ist aber nur bei sehr niedrigen Chloridgehalten und hohem pH-Wert der Fall, also im *passiven* Zustand und damit bei extrem niedrigen Stromdichten, die keine Korrosionsgefährdung bewirken. Im Anodenwiderstand vereinigt stellen wir uns vor:

- Durchtrittswiderstand der Eisenionen in die Porenlösung
- An- und Ab-Transportwiderstand für Chlor-, Hydroxyl- und Eisenhydroxyl-Ionen an der Anode

Die Größe des Anodenwiderstandes ist abhängig von:

- a) Chloridgehalt der Porenlösung  
Mit zunehmendem Gehalt wird Widerstand  $R_A$  kleiner; bei Verlust der Passivität fällt er um Zehnerpotenzen
- b) Temperatur  
Mit zunehmender Temperatur wird die Auflösung von Eisen, der An- und Abtransport von Ionen erleichtert; der Widerstand  $R_A$  wird kleiner.
- c) Betonaushärtung und -alter  
Mit zunehmender Aushärtung nimmt die Porosität des Betons ab, die Transportvorgänge werden behindert; der Widerstand  $R_A$  steigt.
- d) Geometrie und räumliche Bedingungen  
Anodenflächen sind meist sehr viel kleiner als Kathodenflächen; die Bündelung der Strompfade vor der Anode führt zu höheren Stromdichten und damit zu erhöhtem Widerstand. Mit zunehmender Anodenfläche fällt Widerstand  $R_A$ .

Von *kathodischer Steuerung* sprechen wir, wenn die kathodische Teilreaktion die bestimmende Größe ist, also  $R_A$  und  $R_{EL}$  klein gegen  $R_K$  sind. Dies trifft näherungsweise für Makroelemente zu, deren Anodenflächen nicht zu klein aber ausreichend feucht und chloridkontaminiert und ihren Kathodenflächen örtlich direkt benachbart sind (z. B. Konzentrations-element). Im Kathodenwiderstand vereinigt stellen wir uns vor:

- Durchtrittswiderstand der Elektronen zur Entladung der Hydroxyl-Ionen
- Diffusionswiderstand für Sauerstoff an der Kathode.

Die Größe des Kathodenwiderstandes ist abhängig von:

- a) Sauerstoffgehalt und Diffusion  
Mit zunehmender Sauerstoffverfügbarkeit wird  $R_K$  kleiner; verfügbarer Sauerstoff muß durch Diffusion von der Oberfläche nachgeliefert werden.
- b) Temperatur  
Mit zunehmender Temperatur werden Ladungsdurchtritt und Sauerstoffdiffusion erleichtert; der Widerstand  $R_K$  fällt.
- c) Stromdichte  
Mit zunehmender Stromdichte wird Widerstand  $R_K$  größer; der verfügbare Sauerstoff wird schneller verbraucht.

Von *elektrolytischer* oder *Widerstandssteuerung* sprechen wir, wenn der elektrolytische Teilprozeß die bestimmende Größe ist, also  $R_A$  und  $R_K$  klein gegen  $R_{EL}$  sind. Dies trifft näherungsweise für Makroelemente zu, deren Anodenflächen nicht zu klein und ausreichend chloridkontaminiert sind und deren größere Kathodenflächen *räumlich* weiter *entfernt*, aber ausreichend feucht und gut belüftet sind (z. B. Belüftungselement). Im elektrolytischen Widerstand vereinigt stellen wir uns alle Hemmungen vor, die der Ionenbewegung entgegenstehen. Seine Größe ist abhängig von:

- a) Wassergehalt  
Wassergehalt bestimmt entscheidend die Größe des Widerstandes; mit zunehmendem Gehalt fällt  $R_{EL}$  steil ab
- b) Chloridgehalt  
Mit zunehmendem Gehalt wird Widerstand  $R_{EL}$  kleiner.
- c) Temperatur  
Mit zunehmender Temperatur wird Widerstand  $R_{EL}$  kleiner; Einfluß aber stark vom jeweiligen Wassergehalt abhängig.
- d) Betonaushärtung und -alter  
Mit zunehmender Aushärtung des Betons nimmt die Betonporosität und damit die Ionenbeweglichkeit ab; der Widerstand  $R_{EL}$  steigt an.

Das Korrosionsgeschehen praktischer Stahlbetonbauteile wird meist von einer *Mischform* gesteuert, bei der die Korrosionsintensität durch die kathodische Reaktion und einen mehr oder minder merklichen Anteil des elektrolytischen Prozesses in ihrer Größe bestimmt wird (kathodische *und* Widerstandssteuerung).

In starkem Maße bestimmt natürlich auch die im Stromkreis wirksame elektrische Spannung die Größe des Korrosionsstromes. Diese Spannung rührt aber her aus der *Potential-Differenz* zwischen anodischen, also negativeren und kathodischen, also positiveren Bereichen der Stahloberfläche. Es müssen sich daher räumlich immer erst Bereiche unterschiedlichen Potentials herausbilden, bevor Korrosion einsetzen kann. Die jeweilige Größe des sich einstellenden örtlichen Potentials ist abhängig von:

- a) Wassergehalt  
Potential wird mit zunehmendem Wassergehalt negativer; Austrocknung bewirkt positiveres Potential.
- b) Sauerstoffgehalt  
Potential wird mit zunehmendem Gehalt (Belüftung!) positiver; erhöhter Verbrauch bewirkt negativeres Potential.
- c) Chloridgehalt  
Potential wird mit zunehmendem Gehalt negativer.
- d) Betonaushärtung und -alter  
Potential wird mit zunehmender Aushärtung des Betons positiver, edler. Alle Vorgänge, die mit Zeitablauf den Nachschub von Chloriden, Sauerstoff und Feuchtigkeit behindern, verändern das Potential zu edleren, positiveren Werten.
- e) Karbonatisierung  
Potential wird mit tiefer eindringender Karbonatisierung unedler, negativer.

Mit einem elektrischen Ersatzschaltbild lassen sich auch die Vorgänge und Bedingungen für den *kathodischen Korrosionsschutz* erläutern, siehe Bild 1.8.

Die Schutzanlage wird dargestellt durch eine zusätzliche eingeführte elektrische Spannungsquelle  $U_S$  mit dem Widerstand  $R_S$ . Dieser Widerstand beschreibt, ähnlich wie  $R_A$  an der unedleren Stahloberfläche, den Prozeß der anodischen Reaktion an der Schutzanode. Für ihn gelten die gleichen Abhängigkeiten wie vorstehend für den Widerstand  $R_A$  beschrieben.

Für die linke Masche des Bildes 1.8 gilt:

$$U_A - U_S = I_A \cdot R_A + I_A \cdot R_{EL} - I_S \cdot R_S$$

Korrosionsschutz ist gegeben für  $I_A = 0$  :

$$U_S = U_A + I_S \cdot R_S \quad ; \quad I_S = I_K$$

Die Schutzspannung muß um den Spannungsfall am Schutzwiderstand größer sein als die Anodenspannung.



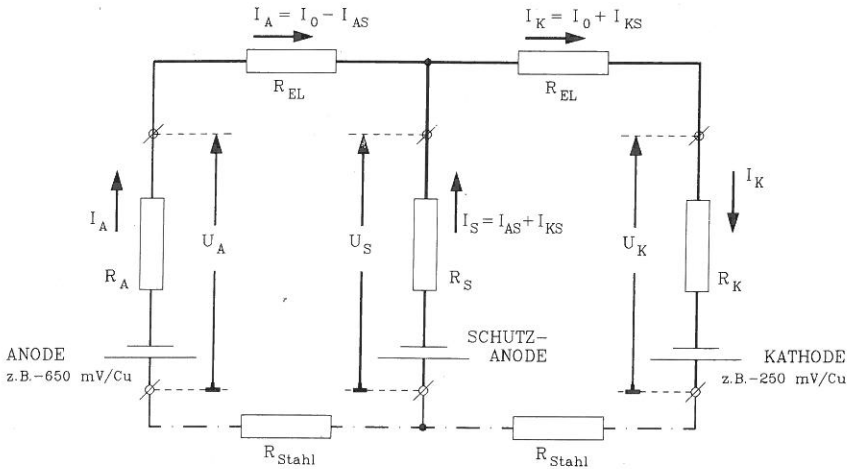


Bild 1.8 Elektrisches Ersatzschaltbild des kathodischen Korrosionsschutzes

Teilen wir den Schutzstrom  $I_S$  zunächst willkürlich auf in die Teilströme

$$I_S = I_{AS} + I_{KS}$$

so ist mit dem Korrosionsstrom  $I_0$  ohne KKSB Korrosionsschutz gegeben für:

$$I_A = I_0 - I_{AS} = 0$$

$$I_K = I_0 + I_{KS}$$

Durch den KKSB wird der Strom an der Anode zu Null; der Strom an der Kathode erhöht sich um den Anteil  $I_{KS}$ .

Für die rechte Masche des Bildes 1.8 gilt:

$$U_S - U_K = I_S \cdot R_S + I_K \cdot R_{EL} + I_K \cdot R_K$$

Korrosionsschutz war vorausgesetzt mit  $I_A = 0$  ;  $I_S = I_K$

$$U_K = U_S - I_S (R_S + R_{EL} + R_K)$$

bzw.  $U_K = U_A - I_S (R_{EL} + R_K)$

Die Spannung an der Kathode ist um die jeweiligen Spannungsfälle kleiner als die Spannung der Schutzanode bzw. Anode.

Für Korrosionsschutz, d. h.  $I_A = 0$ , ist der erforderliche Schutzstrom bestimmt durch die Potentialdifferenz des korrodierenden Stahls und die Summe der Widerstände des elektrolitischen und des kathodischen Prozesses:

$$I_S = \frac{U_A - U_K}{R_{EL} + R_K}$$

### 1.10 Indikationen für einen kathodischen Schutz in Stahlbeton

Die meisten Korrosionsschäden im Hafengebäude, die durch Risse und Abplatzungen sichtbar werden, sind auf das Eindringen von Chloriden bei unterschiedlicher Belüftung und Benetzung zurückzuführen. Der Beton selbst wird kaum beeinflusst; seine Festigkeit muß, auch bei eingedrungenen Chloriden, nicht abfallen.

Bei der Instandsetzung muß der Bewehrungsstahl vor weiterer Korrosion auf Dauer geschützt, abgeplatzter und gerissener Beton wiederaufgebaut werden. Noch tragfähiger Deckbeton — auch chloridverseucht — muß bei Anwendung des KKSB nicht entfernt werden, solange keine Gefügelockerungen eingetreten sind.

Die *Indikation* zur Anwendung des KKSB bei korrosionsgeschädigten Stahlbetonbauwerken ist immer dann gegeben, wenn:

a) mit bleibendem Chlorideintrag zu rechnen ist,

z. B., wenn die Chloridfront über die erste Bewehrungslage hinaus in den Beton eingedrungen ist und daher, selbst bei Abtrag der gesamten Deckschicht, nicht mehr entfernt werden kann (Konventionelle Sanierung würde jetzt eine erhebliche Korrosionsgefährdung der zweiten Bewehrungslage bewirken),

z. B., wenn der Abtrag der chloridkontaminierten Deckschicht aus statischen Gründen, nämlich Verlust der Druckzone, nicht möglich ist,

z. B., wenn der Abtrag der chloridkontaminierten Deckschicht aus örtlichen Gründen, wie an vertikalen, der Tide ausgesetzten Flächen, aber auch aus anderen, z. B. wirtschaftlichen Gründen, nicht möglich ist.

- b) mit wiederkehrendem Chlorideintrag zu rechnen ist,  
 z. B., durch Meerwasserbenetzung im Wasserwechsel- und Spritzbereich, durch Tausalzbelastung, durch Umschlag chloridhaltiger Stoffe wie Stein- oder Kalisalz.
- c) frühere, mit betontechnologischen Mitteln allein ausgeführte Sanierungen gescheitert sind,  
 z. B., weil die Chlorideintragung nicht ausreichend entfernt wurde,  
 z. B., weil die Wirkung von galvanischen Elementen, entstanden aus Potentialdifferenzen zwischen der aktiven Bewehrung des nicht sanierten Altbetons und der im sanierten Neubereich passiven Bewehrung, nicht aufgehoben wurde,  
 z. B., weil die aufgebrauchte Oberflächenbeschichtung das erneute Eindringen von Chloriden nicht verhindern konnte.

Die Indikationen zur Anwendung des KKS als *Vorsorgemaßnahme* bei Neubauten, einhergehend mit verringerten Erstkosten, ist immer dann gegeben, wenn mit bleibender Chloridverseuchung zu rechnen ist.

Der KKS ist üblicherweise als Einrichtung vorgesehen, die während der gesamten, bzw. der verbleibenden Lebensdauer des Bauwerks wirksam ist. Das angelegte elektrische Feld läßt die Chloridionen vom Bewehrungsstahl zur Schutzanode wandern, was langfristig einer Entsalzung entspricht. An der Bewehrung erfolgt dagegen eine elektrochemische Alkalisierung durch Bildung und Wanderung von Hydroxylionen. Es liegt daher nahe, Verfahren zu entwickeln, die nur temporär — z. B. über eine Woche, mit mobilen, mehrfach zu verwendenden, außen auf den Beton gesetzten Anoden — eine solche Entsalzung bewirken. Die dazu erforderlichen höheren elektrischen Spannungen und Stromdichten (bis 1000 mA/m<sup>2</sup>, gegenüber 20 mA/m<sup>2</sup> bei KKS) können Probleme bereiten. Es kann z. B. zur Entschichtung im Beton und damit zur Lockerung des Haftverbundes zwischen Beton und Bewehrung, sowie zur Wasserstoffentwicklung kommen. Darüber hinaus wandern die positiv geladenen Alkaliionen zur Kathode. Sie werden somit im Bereich der Bewehrung akkumuliert und können bei alkali-empfindlichen Zuschlagstoffen entsprechende Treiberscheinungen auslösen.

Die Wirkung des Verfahrens bleibt temporär, es sei denn, es wird nach Abtragen der Decklage zur Entsalzung unzugäng-

licher Betonbereiche und vor erneuter Aufbringung des Deckbetons angewendet. Der Deckbeton müßte dann aber versiegelt werden können, um ein Wiedereindringen von Chloriden sicher und auf Dauer zu verhindern. Eine Bedingung, die bei Hafengebäuden schwer zu realisieren ist.

### 1.11 Instandsetzung und Vorbeugung durch kathodischen Schutz der Bewehrung

Die *Instandsetzung* korrosionsgeschädigter Stahlbeton-Bauwerke erfolgt in mehreren Arbeitsgängen:

#### a) Vorbereitung:

Durch Druckwasserstrahlen oder Sandstrahlen werden lockere Altbetondeckschichten entfernt und die Betonoberflächen aufgeraut. Im Gegensatz zur Instandsetzung mit konventionellen, rein betontechnologischen Mitteln ist die Entfernung aller chloridkontaminierten Betonbereiche nicht erforderlich. Soweit bei diesen Vorbereitungsarbeiten Bewehrungsstäbe freigelegt werden, müssen diese mit einem Reparaturmörtel abgedeckt werden, um eine elektrische Trennung zwischen Bewehrungskathode und Schutzanode sicherzustellen.

#### b) Elektro-Arbeiten:

Die Anoden werden auf der vorbereiteten Betonoberfläche befestigt und die elektrischen Verbindungen hergestellt. Meßelektroden (Dauer-Bezugs-Elektroden unterschiedlichster Bauart) zur ständigen und temporären Erfassung und Überwachung des Potentials der Bewehrung werden angebracht und angeschlossen.

#### c) Abdeckung

Anoden, Elektroden, Kabel und Leitungen werden in einer Mörtelschicht eingebettet und/oder mit einer Spritzbetonschicht abgedeckt.

Im Gegensatz zu den bei betontechnologischen Instandsetzungsmaßnahmen eingesetzten PCC-Mörteln kommen hier nur reine Zementmörtel oder Mörtel mit Zusatzmitteln in Frage, deren Leitfähigkeit groß genug ist, um als Elektrolyt wirksam zu bleiben und deren Permeabilität das Ausgasen von Sauerstoff, und evtl. von Wasserstoff ermöglicht. Bei entsprechendem Deckmörtel entweichen z. B. 40 l Sauerstoff aus einem Quadratmeter Betonfläche pro Jahr.

Die *vorbeugende* Anwendung des KKSB unterscheidet sich von der Instandsetzung mit KKSB nur durch die Vorbereitung der Oberfläche nach a), die beim Neubau entfällt.

### 1.12 Instandsetzung mit betontechnologischen Maßnahmen

Durch Korrosion geschädigte Stahlbetonbauwerke werden seit vielen Jahren auch mit nur betontechnologischen Maßnahmen instandgesetzt. Dabei werden die durch Karbonatisierung geschädigten und durch einen – jeweils festzulegenden – maximalen Chloridgehalt kontaminierten Betonbereiche in der Umgebung der Bewehrung entfernt. Die Betonstähle werden, soweit möglich, durch Strahlbehandlung von Korrosionsprodukten befreit und teilweise mit einem passiven Korrosionsschutz beschichtet. Auf den Altbeton wird nach Aufbringen einer Haftbrücke der Reparaturmörtel aufspachtelt (Spachtelmethode). Sind die Schäden großflächiger, wird die neue Decklage gegossen oder als Spritzbeton hergestellt.

Die instandgesetzten Betonoberflächen werden mit organischen Schutzsystemen beschichtet, um das Eindringen von Luft und Feuchtigkeit zu verhindern.

Die beschriebenen Sanierungsmethoden beinhalten eine Reihe von Nachteilen und Risiken, z. B.:

- Eine Beschichtung von der Gegenseite (etwa die Unterseite über dem Wasser) ist wegen Unzugänglichkeit oft nicht möglich (z. B. bei Pierplatten über Pfählen).
- Ein chloridverseuchter Beton kann meist nur bis zur ersten Bewehrungslage abgetragen werden. Tiefergelegene, bisher inaktive Bewehrungslagen sind nach der Sanierung korrosionsgefährdet. Das gleiche gilt für unveränderten Altbeton in der Nachbarschaft. In beiden Fällen erlangen die sanierten Bereiche ihre ursprüngliche hohe Alkalität, während die nichtsanierten Bereiche im Altbeton ihre Chlorideinlagerungen behalten. Die Folge ist die Ausbildung von Potentialdifferenzen zwischen kathodischen (sanierten) und anodischen (nichtsanierten) Bereichen. Die Korrosionsvorgänge setzen von neuem ein. Infolge der möglichen, ungünstigen Flächenverhältnisse (Anode  $\ll$  Kathode) können hohe Abtragungsraten auftreten.

Ein chloridverseuchter Beton mit Korrosionsschäden kann im allgemeinen mit betontechnologischen Maßnahmen allein nicht dauerhaft saniert werden. Das Risiko des Wiederauftretens der Korrosion bleibt bestehen.

## **2 Fachliche Voraussetzungen für die Anwendung des KKSB**

### **2.1 Nachweis der bautechnischen Eignung der Anodensysteme**

Vor Anwendung des KKSB sowohl zur Instandsetzung als auch als Vorsorgemaßnahme an gefährdeten Neubauten ist die bautechnische Eignung und Dauerhaftigkeit der Anodensysteme nachzuweisen, sofern eine allgemeine Bauzulassung für das System noch nicht erteilt wurde.

### **2.2 Qualifikation der Betriebe des kathodischen Korrosionsschutzes**

Für die Vorbereitung und Durchführung kommen nur erfahrene und anerkannte Betriebe des kathodischen Korrosionsschutzes mit fachkundigen Ingenieuren in Frage, die mit zugelassenen Betonbaufirmen und deren Betonfachingenieuren zusammenarbeiten.

Darüber hinaus gelten die Richtlinien zur Qualitätsüberwachung der Ausführung, welche in Zusammenarbeit der „Gütegemeinschaft Beton“ mit dem „Fachverband kathodischer Korrosionsschutz“ erarbeitet werden.

## **3 Vorgehen bei Instandsetzungen an bestehenden Bauwerken**

### **3.1 Durchführung der Schadensanalyse**

Eine planmäßige Diagnose kann anhand von Checklisten vorgenommen werden (z. B. „Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Richtlinie für Schutz- und Instandsetzung von Betonbauteilen, 1990“). In den meisten Fällen sind der Diagnose jahrelange Beobachtungen von zunehmenden Korrosionsschäden bei Inspektionen des Bauwerks vorausgegangen. Zur Durchführung der Schadensanalyse sind alle für die vorangegangenen Korrosionen und die sie begleitenden Betonschäden relevanten Vorgänge im Lebenslauf des kritischen Betons zu erfassen.

Dazu gehören:

- Statische Berechnung, Bewehrungspläne, verwendete Stähle
- Betonfestigkeit, Zementart, Wasser-Zement-Wert, Zementanteil
- Betondeckung mit Plus- und Minusabweichungen
- Tiefe und Verteilung der Karbonatisierung
- Konzentrationsprofile der Chlorionen
- Verteilung der Feuchtigkeit
- Darstellung der Risse im Beton mit evtl. bekannten Ursachen
- Abplatzungen mit evtl. bekannten Ursachen (z. B. Schiffstoß)
- Ergebnisse örtlicher Sichtprüfungen auf Korrosionsschäden, evtl. auch nach Öffnen des Deckbetons
- Abklopfen des Deckbetons mit dem Handhammer
- Potential- und Potentialfeldmessungen

Außere Risse im Deckbeton und Betonabplatzungen, unter denen Korrosionen der Stahlbewehrung auftreten, sind durch Sichtprüfungen an der Oberfläche leicht erkennbar und bedürfen keiner weiteren Untersuchungen (vergl. Abschnitt 1.3).

Durch einfaches Abklopfen mit dem Handhammer lassen sich Korrosionsschäden orten, die durch Lockerung des Haftverbundes Beton/Bewehrung verursacht worden sind, aber noch nicht von außen sichtbar sind. Derartige Stellen machen sich durch ein hohl klingendes Fehlerecho bemerkbar.

Durch die beschriebenen, einfachen Untersuchungen lassen sich jedoch nicht alle Korrosionsangriffe nachweisen, insbesondere kurz nach Korrosionsbeginn. Die Korrosionsprodukte müssen nicht notwendigerweise auf der Stahloberfläche abgesetzt werden. Sie setzen sich, besonders bei Vorhandensein galvanischer Elemente, auch im Betongefüge ab. Sie entstehen dort, wo die Eisenionen der anodischen und die Hydroxylionen der kathodischen Teilreaktion aufeinandertreffen, was wiederum von der Leitfähigkeit des Elektrolyten abhängt. Das Porengefüge des Deckbetons kann diese Produkte über

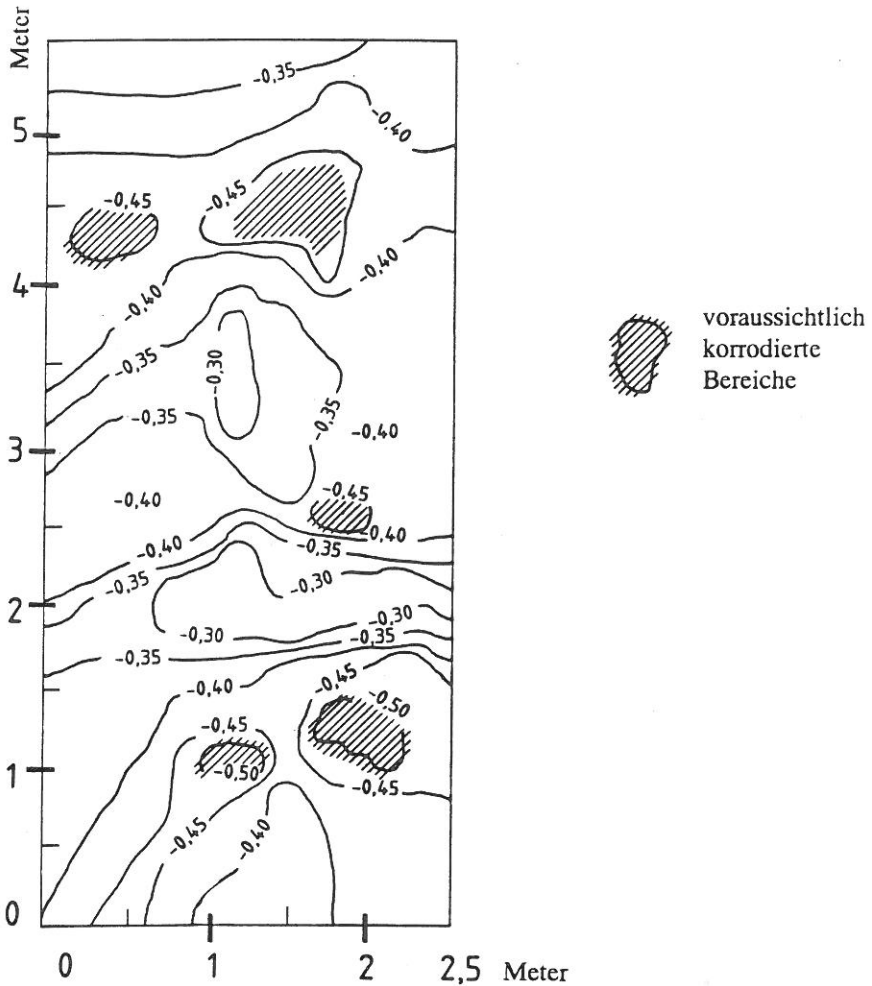


Bild 3.1 Äquipotentiallinien an der Oberfläche einer korrodierten Brückenbetonplatte vor dem Aufbringen eines kathodischen Korrosionsschutzes; Werte in Volt gegen Cu/Cu SO<sub>4</sub>-Elektrode (V/Cu)

längere Zeiten aufnehmen, ohne daß Risse im Beton entstehen. Das gilt insbesondere bei hohen Betondeckungen und kurze Zeit nach Beginn des Korrosionsvorganges. Zur Feststellung und Ortung dieser Korrosionsschäden können nur elektrochemische Meßverfahren, nämlich Potential- und Potentialfeldmessungen, herangezogen werden. Solche Mes-



sungen werden mit einer oder mehreren, mobilen, auf der Oberfläche des Betons aufgesetzten Bezugselektrode ausgeführt. Für den praktischen Einsatz werden üblicherweise Kalomel- oder Cu/CuSO<sub>4</sub>-Halbzellen verwendet, mit denen das elektrochemische Potential an der Betonoberfläche ortsabhängig gemessen wird. Das Ergebnis einer solchen Potentialmessung zeigt Bild 3.1. Hier sind die an der Oberfläche einer Brückenbetonplatte gemessenen Potentialwerte in Form ihrer Äquipotentiallinien dargestellt.

Die Auswertung und Interpretation in Bezug auf Korrosionsangriff ist schwierig und bedarf großer Erfahrung. Die Meßergebnisse sind in hohem Maße abhängig von der temporären Durchfeuchtung, — Wassersättigung läßt das Potential aller Flächen dramatisch absinken —, von der örtlichen Qualität des Betons und der örtlichen Dicke der Deckschicht. Mit der auf die Betonoberfläche aufgesetzten Meßelektrode wird ja nicht direkt das Potential an der Phasengrenze Stahl/Beton (Elektrolyt) erfaßt. Gemessen wird vielmehr das Potential an der Phasengrenze Beton (Elektrolyt) /Meß-Halbzelle, das dem durch den Korrosionsstrom erzeugten elektrischen Feld an der *Betonoberfläche* entspricht, siehe Bild 3.2.

Qualitativ kann aber gesagt werden, daß negativere Potentialwerte auf eine größere Korrosionswahrscheinlichkeit hinweisen.

Im anglo-amerikanischen Arbeitsbereich ist z. B. eine pragmatische Interpretation entsprechend dem ASTM-Standard C 876 — 80 üblich:

Potential-Meßwert gegen Cu/CuSO <sub>4</sub> -Zelle	Korr.Wahrscheinlichkeit	Passivierungs-Aussage
> - 250 mV	10 %	Passivierung wahrscheinlich
- 250 mV bis - 350 mV	—	Aussagen nicht möglich
< - 350 mV	90 %	Depassivierung wahrscheinlich

Diese Tabelle ist das Resultat statistischer Untersuchungen an tausalzbelasteten Brückendecks. Für andere Bauwerke ist sie daher nur bedingt anwendbar, auch wenn sie der Anschaulichkeit wegen häufig herangezogen wird.

Die Potentialmeßwerte können auch mit Hilfe des „Merkblattes für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken B3“, Ausgabe April 1990, der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, bewertet werden.

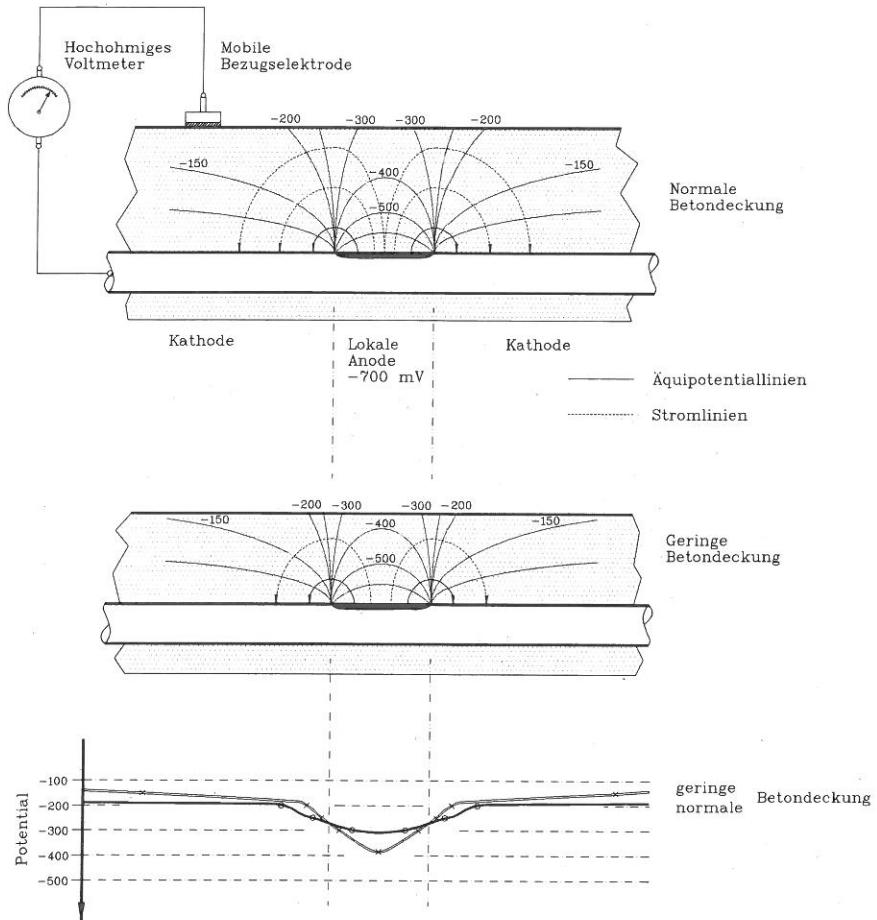
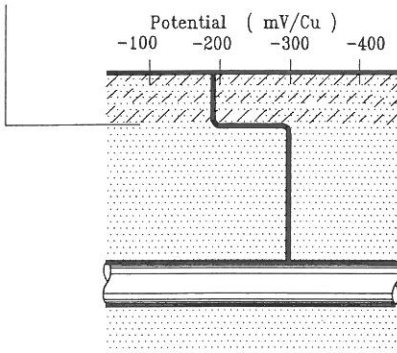


Bild 3.2 Oberflächenpotential in mV/Cu bei unterschiedlichen Betondeckungen

Alle elektrochemischen Potentialmessungen unterliegen bestimmten Versetzungen, die sorgfältig ermittelt und streng beachtet werden müssen, um die Fehlinterpretation der gewonnenen Meßdaten auszuschalten. Die an der Oberfläche des Betons gemessenen Potentialwerte können gegen das wirkliche Potential der Bewehrung versetzt werden, z. B. durch Karbonatisierung und/oder Chloridverseuchung des Betons, durch Versiegelung bzw. Beschichtungen der Oberfläche, durch galvanische Ströme innerhalb der eingetauchten und nicht eingetauchten Bewehrung (Crane [7]). Die Bilder 3.3, 3.4 und 3.5 zeigen diese Verfälschungen:

Tiefe der  
Karbonatisierung



Chlorid im  
Porenwasser

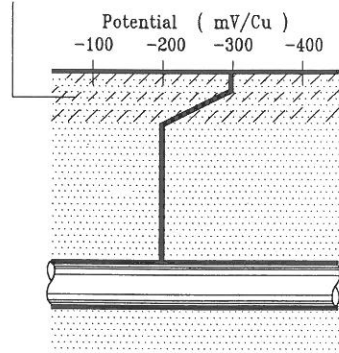
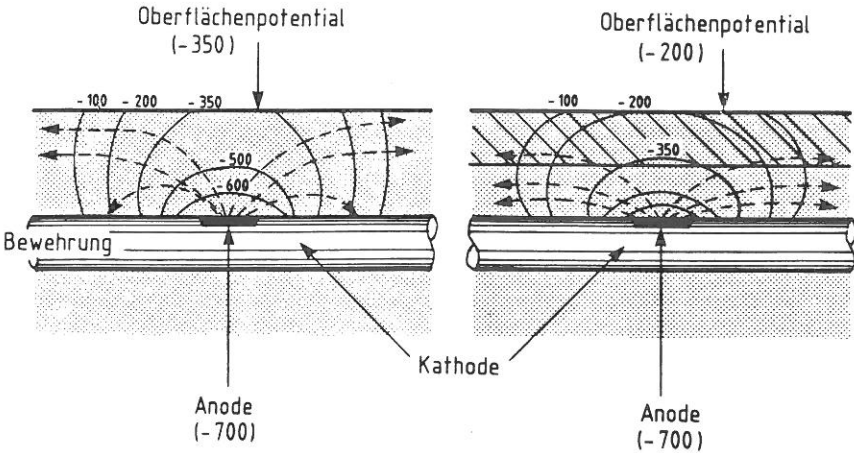


Bild 3.3 a) Versetzung in positiver Potential-Richtung durch Karbonatisierung [7]

b) Versetzung in negativer Potential-Richtung durch Chloridverseuchung [7]



a) Normalbeton, spezif. Widerstand  $r_B$

b) Deckschicht, spezif. Widerstand  $r_D$

————— Äquipotentiallinien (mV/Cu)  
----- Stromlinien

Bild 3.4 Versetzung in positiver Potential-Richtung durch aufgebraute Versiegelungen bzw. Deckschichten mit erhöhtem spezifischem Widerstand [7].

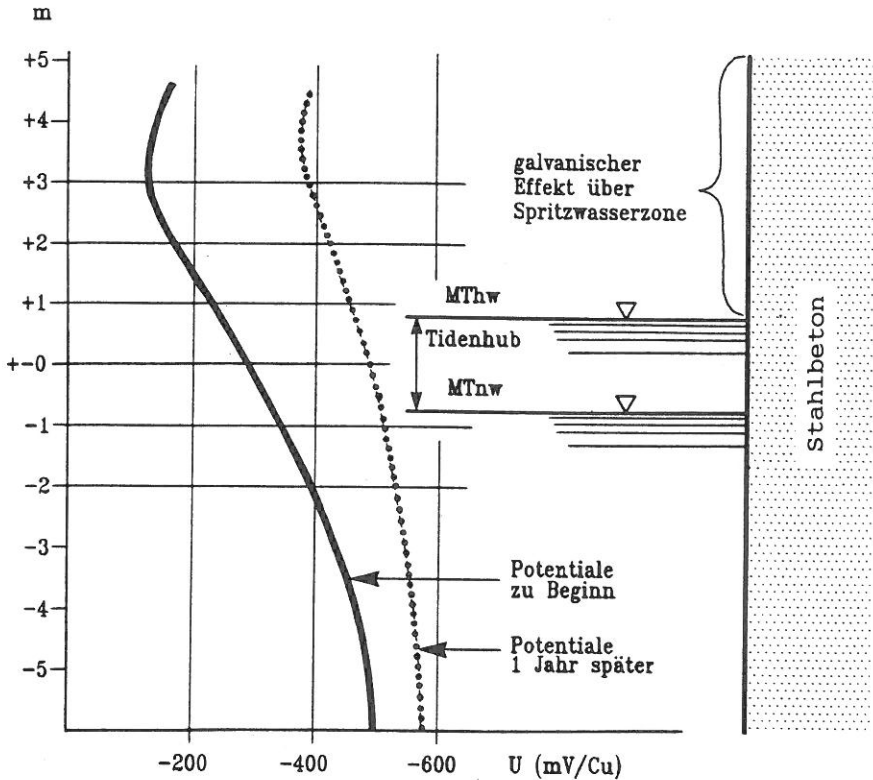


Bild 3.5 Allmähliche Verschiebung in negativer Potential-Richtung durch galvanische Ausgleichsströme [7] (Elementbildung nach Bauwerkserstellung)

Diese Meßwerte erlauben nur die Deutung, ob und wo Korrosion der Bewehrung abläuft, aber nicht, wie stark die Korrosionsvorgänge im Meßbereich sind; denn die *Potentialdifferenz* zwischen Anoden- und Kathodenflächen bestimmt die Intensität der Korrosion, gemessen werden aber lediglich die Anodenpotentiale. Eine standortspezifische Justierung der Potentialwerte durch lokales Entfernen der Deckschicht, erneute Potentialmessungen, evtl. auch nach anodischer Polarisation der Bewehrung und andere Verfahren, wie Widerstands- und Magnetfeldmessungen, sind im Einzelfall heranzuziehen, um eine gesicherte Interpretation des Korrosionsgeschehens zu ermöglichen.

### 3.2 Entscheidung über die Instandsetzung

Aufgrund der Ergebnisse aus der Schadensanalyse ist zu entscheiden, ob das schadhafte Bauwerk

- belassen und weiter beobachtet,
- instandgesetzt
- oder abgebrochen werden soll.

#### Instandsetzung

a) Für die Instandsetzung mit *betontechnologischen Maßnahmen* kommen in Frage:

- Bereiche mit mechanischen Beschädigungen und Bereiche, bei denen ein Wiederauftreten der Korrosion während der Restnutzungsdauer nicht zu befürchten ist (vergleiche Abschnitt 1.12).

b) Für die Instandsetzung mit *KKSB* kommen in Frage:

- Bereiche mit höherem Chlorideintrag, bei denen eine Weiternutzung für mehrere Jahre erwünscht ist und die dem Abschnitt 1.10, Indikationen zur Verwendung von KKSB, entsprechen,
- und bei denen die statisch konstruktiven und betriebstechnischen Voraussetzungen gegeben sind, insbesondere die Qualität des Stahlbetons noch erhaltungswürdig und die Sanierungskosten wirtschaftlich vertretbar sind.
- Bereiche, bei denen die Regeln der betontechnologischen Instandsetzung nicht oder nur eingeschränkt einzuhalten sind (z. B. aus Platz- und Verarbeitungsgründen, in Tidegebieten an Untersichten von Deckenkonstruktionen u. ä.).

c) Die Instandsetzung mit *elektrochemischer Entsalzung* kommt in Frage:

- wenn eine Chloridverseuchung durch außergewöhnliche, im allgemeinen nicht wiederkehrende Umstände, z. B. nach PVC-Brand und Bildung von Salzsäure infolge von Löscharbeiten, oder nach temporärer Meerwasserwirkung infolge von Überflutungen, an einem sonst gesunden Beton eingetreten ist (vergleiche Abschnitt 1.10).

Abbruch

Bauteile, bei denen der Beton mit vernünftigem Aufwand nicht mehr instandzusetzen ist, werden abgebrochen. Bei Erneuerung des Bauteils an gleicher Stelle kann es zweckmäßig sein, vorsorglich KKSB einzusetzen (vergleiche Abschnitt 4 und 5).

### 3.3 Wirksamkeit des KKSB, Schutzpotential und Schutzkriterien

Die Wirksamkeit des KKSB muß durch Messung nachgewiesen und auf Dauer unter Kontrolle gehalten werden.

Der KKSB ist dann wirksam, wenn die über die Schutzanode eingeleiteten Schutzströme das Potential der weniger negativen, kathodischen Bereiche der Bewehrung auf das Potential der stärker negativen, anodischen Bereiche absenken. Die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode wird Null; der an der bisherigen Anode austretende Korrosionsstrom ist somit kompensiert. Bei geringer, weiterer Erhöhung des Schutzstromes werden auch die bisherigen Anodenflächen gezwungen, Schutzstrom aufzunehmen oder kathodisch zu reagieren, d. h. Sauerstoff zu reduzieren.

Dieser von Punkt zu Punkt wechselnde, mindesterforderliche Schutzstrom, besser gesagt die örtliche Schutzstromdichte, kann am Bauwerk selbst nicht direkt gemessen werden. Ihm entspricht aber ein örtlich meßbares Schutzpotential, das als Ausgangsgröße für die Definition von Schutzkriterien herangezogen wird.

Dieses Schutzpotential ist eine auf den Meßpunkt bezogene, von den Umgebungsbedingungen abhängige Variable, die dem ständigen Wechsel der Leitfähigkeiten im Zusammenhang mit Feuchte und Chlorideintrag sowie dem Wechsel der Diffusion infolge Porosität, Durchfeuchtung und Austrocknung unterworfen ist. Es gibt kein einheitliches Ruhepotential über eine größere Bauteilfläche und damit auch kein einheitliches Schutzpotential, bei dessen Einhaltung die Korrosionsströme grundsätzlich blockiert wären. Umfangreiche Detailuntersuchungen haben gezeigt, daß abhängig von den Umgebungsbedingungen örtliche Potentiale von  $-550$  mV bis  $-950$  mV/Cu erforderlich sind, um Schutz zu erzwingen. Dennoch schreibt DIN 30 676 einen Standardwert von  $-750$  mV/Cu vor. Auch amerikanische und britische Vorschriften nennen ähnliche Grenzwerte:

**Kriterium 1:**  $U_s < -750$  mV/Cu, (I · R)-frei gemessen

Eine solche Festlegung eines Grenz- oder Standardwertes ist zumindest für die Bedingungen des Hafenbaues nicht bzw. nicht allein hinnehmbar. Sie wird den praktischen Forderungen nicht gerecht. Das liegt daran, daß die Verschiebung des Ausgangspotentials, des örtlichen Ruhepotentials vor Einschaltung der KKS-Anlage, an jeder Stelle auf derartige oder noch negativere Werte schwierig werden kann und — wenn überhaupt — nur mit gefährlich hohen Stromdichten und treibenden Spannungen zu erreichen ist. Das gilt besonders für noch relativ junge Bauwerke mit noch nicht weit fortgeschrittener Korrosion. Bei Hafenbauwerken muß mit zeitlich und örtlich sehr unterschiedlichen Feuchten des Betons gerechnet werden; Wasserstand, Tide, Schwall und Spritzwasser, aber auch Sonneneinstrahlung und Wind spielen eine erhebliche Rolle. Die augenblickliche Feuchte einer bestimmten Betonfläche bestimmt ihren Diffusionswiderstand für Gase und damit auch die Menge an Sauerstoff, die zur Reduktion, also zur kathodischen Reaktion, zur Verfügung steht. Relativ feuchter Stahlbeton, dessen Sauerstoffverfügbarkeit gering ist, zeigt negativeres Potential und läßt sich mit geringen Schutzstromdichten leicht auf/unter das Grenzpotential polarisieren. Trockener Stahlbeton dagegen, mit wesentlich höherer Sauerstoffverfügbarkeit, weist ein positiveres Potential auf und läßt sich nur mit relativ hohen Schutzstromdichten in Richtung zum Grenzpotential hin polarisieren, ohne es jedoch mit praktischen, ungefährlichen Stromdichten von 35 bis 50 mA/m<sup>2</sup> Stahloberfläche zu erreichen.

Verbraucht also der Schutzstrom den Sauerstoff schneller als er nachgeliefert werden kann, polarisiert die Stahloberfläche zu negativeren Werten. Ist jedoch die verfügbare Sauerstoffmenge im Gleichgewicht mit dem Verbrauch, ergibt sich keine Potentialverschiebung. Aufgabe eines wirksamen KKS ist es aber, alle Stahloberflächen zur Stromaufnahme und damit zur Reduktion von Sauerstoff zu zwingen. Ist dieser Zustand erreicht, bewirkt eine weitere Erhöhung der Schutzstromdichte nur eine unnötige zusätzliche Reduktion von Sauerstoff. Ein vorgeschriebenes, *überall* wirksames Standardpotential, wie z. B. nach DIN mit  $-750 \text{ mV/Cu}$ , wird den Verhältnissen, wie sie an den Bauteilen im Hafenbau anzutreffen sind, nicht gerecht. Entscheidend ist, daß der Schutzstrom an der Bewehrung eine derartige Potentialverschiebung erzwingt, daß das örtlich am wenigsten negative Potential auf das negativste, vor der Einschaltung gemessene Ortspotential abgesenkt wird. Jetzt nehmen alle Oberflächenbereiche Schutzstrom auf, der Korrosionsstrom ist blockiert. Statistische Unter-

suchungen haben gezeigt, daß zur Einhaltung dieser Bedingung in aller Regel eine Potentialabsenkung von 300 mV ausreicht. Denn eine Absenkung um etwa 200 mV bewirkt bereits eine Herabsetzung der Korrosionsgeschwindigkeit um mindestens zwei Zehnerpotenzen, was wohl als ausreichend anzusehen ist. Für die Spannungsfälle im Schutzkreis verbleibt dann die Reserve von weiteren 100 mV, denn die Messung der Potentialverschiebung erfolgt nicht (I · R)-frei. Als Schutzkriterium läßt sich somit definieren:

„Der Schutzstrom ist so einzustellen, daß das vor Einschalten des KKSB gemessene, am wenigsten negative Ortspotential (Ausgangspotential  $U_0$ ) um mindestens 300 mV abgesenkt wird (Einschaltpotential  $U_{\text{EIN}}$ )“.

**Kriterium 2:**  $\Delta U = U_0 - U_{\text{EIN}} > 300 \text{ mV}$

Hier wird nicht die Einhaltung eines *überall* und jederzeit gleichen absoluten Wertes des Schutzpotentials gefordert, sondern die Verschiebung des vorgefundenen Ausgangspotentials um einen bestimmten Betrag an einer *bestimmten* Stelle. Zweckmäßig für den Einzelfall kann auch die Kombination der Kriterien 1 und 2 sein:

„Das Schutzpotential von  $-750 \text{ mV/Cu}$  ist anzustreben. In Bereichen, in denen dieses Potential mit Stromdichten bis  $35 \text{ mA/m}^2$  nicht erreichbar ist, muß das vor dem Einschalten gemessene, am wenigsten negative Ortspotential um mindestens 300 mV abgesenkt werden“.

Wesentliche Steigerungen der Schutzstromdichten müssen unterbleiben. Sie gefährden die Anoden, beeinträchtigen den Haftverbund zwischen Beton und Bewehrung und führen zur Wasserstoffentwicklung (bei Überschreiten der Zersetzungsspannung des Wassers von 1,23 Volt). Um diese unerwünschten Wirkungen auszuschließen, sollte das *Arbeitspotential* möglichst nicht unter  $-1100 \text{ mV/Cu}$  abgesenkt werden.

Im amerikanisch-britischen Arbeitsraum wird neben einem ähnlichen Schutzkriterium (potential criterion  $U_s < -720$  to  $-850 \text{ mV/Cu}$ ) bzw. einer Mindestverschiebung des Potentials (potential shift  $\Delta U > 200 \dots 400 \text{ mV}$ ) als weiteres Schutzkriterium der Abfall des Potentials 4 Stunden nach Abschalten des KKSB am häufigsten angewandt (potential decay). Dieses Kriterium fußt auf den obigen Überlegungen über die Potentialveränderungen durch Schutzströme und mißt die Depolarisation nach einem bestimmten Zeitraum, meist 4 Stunden:

**Kriterium 3:**  $\Delta U_{\text{Aus}} = U_{\text{Aus}(t=4)} - U_{\text{Aus}(t=0)} > 100 \text{ mV}$



Die angeführten Schutzkriterien gehen grundsätzlich von der Aufhebung der Potentialdifferenzen zwischen den vormals anodischen und kathodischen Bereichen durch den Schutzstrom aus, wodurch der Korrosionsstrom Null wird. Sie gelten daher für jede Art der Bewehrungskorrosion, unabhängig davon, welcher Mechanismus die Korrosionsintensität steuert: die von der Sauerstoffdiffusion bestimmte Intensität bei freier Korrosion aktiver Flächen (Mikroelemente) oder die von den elektrischen Widerständen gesteuerte Intensität bei Elementbildung über größere Entfernungen (Makroelemente), siehe auch Abschnitt 1.6. Derartige Makrozellen bilden sich, wenn Bewehrungsstähe in chloridfreien Betonbereichen mit Stählen in chloridverseuchtem Beton elektrisch leitend miteinander verbunden sind, z. B. im Bewehrungskorb; sie werden als Konzentrationselemente bezeichnet. Befinden sich dagegen gut belüftete Betonbereiche neben sauerstoffärmeren, werden die sich ausbildenden Makroelemente als Belüftungselemente bezeichnet. Solche Bedingungen zur Elementbildung sind gerade bei Hafenbauwerken häufig. Besonders bei ungünstigen Flächenverhältnissen (Anode < Kathode) können sehr viel höhere Korrosionsintensitäten auftreten, als bei freier Korrosion aktiver Flächen. Ihre absolute Größe wird aber durch die elektrischen Widerstände im Stromkreis bestimmt, siehe auch Abschnitt 1.9.

Mit Hilfe des Bildes 3.6 lassen sich für das Beispiel des Makroelementes die Bedingungen der Schutzkriterien wie auch ihre Einhaltung verdeutlichen.

Die Kurve A, im oberen Bildteil, stellt das unbeeinflusste Ausgangspotential  $U_0$  des arbeitenden Makroelementes dar. Das Schutzsystem wird durch eine an der Schutzanode wirksame Spannung  $U$  betrieben. Vor der Bewehrung wird dann das Einschaltpotential  $U_{\text{EIN}}$  gemessen (Kurve B), das sich von der wirksamen Spannung  $U$  im wesentlichen um den Spannungsfall am Übergangswiderstand der Schutzanode unterscheidet.

Die Kurve C stellt das  $(i \cdot R)$ -frei gemessene Einschaltpotential dar, das sich vom  $U_{\text{EIN}}$  der Kurve B um den Spannungsfall  $(i \cdot R)$  am Übergangswiderstand der Bewehrung (Kathode) und am Elektrolytwiderstand des Betons mit der Summenstromdichte  $i = i_s + i_k$  bzw.  $i = i_s - i_A$  unterscheidet. Dieses Potential entspricht dem direkt nach dem Ausschalten der Schutzanlage gemessenen „Sofort-Aus-Potential“, dem  $U_{\text{AUS}}$  zur Zeit  $t = 0$ .

Die Differenz zwischen den Kurven C und D stellt die zeit- und ortsabhängige Polarisation bzw. Depolarisation dar. Das

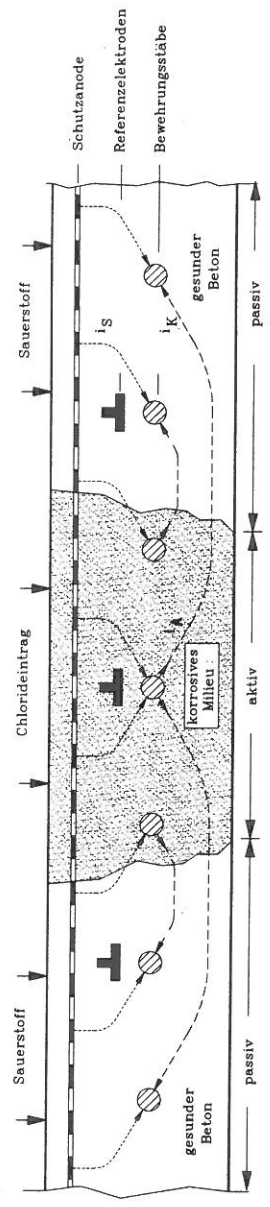
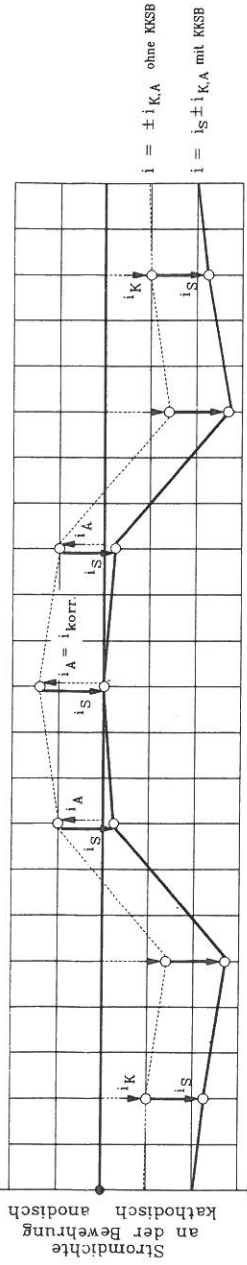
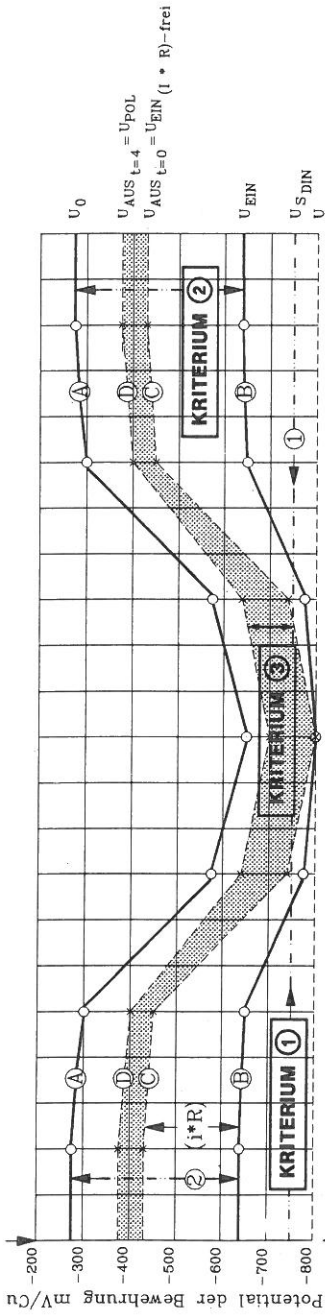


Bild 3.6 Schematische Potential- und Stromdichteverteilung sowie Einhaltung der Schutzkriterien

Potential  $U_{\text{AUS}}$  der Kurve C verändert sich nach beispielsweise 4 Stunden auf das Potential  $U_{\text{AUS}}$  der Kurve D.

Die Kurve für die Korrosionsstromdichte  $i_A$  (Bildmitte) ergibt sich, wenn das Potential gerade so eingestellt wird, daß die Stromdichte  $i_A$  im aktiven Bereich durch die Stromschutzdichte  $i_s$  kompensiert wird. Unter dieser Bedingung ist das Schutzkriterium 1, an jeder Stelle Unterschreitung des ( $i \cdot R$ )-frei gemessenen Potentials (Kurve C) unter das Schutzpotential nach DIN von  $-750$  mV, nur im aktiven Bereich erfüllt. Obwohl keine Korrosion stattfindet, ist das Kriterium im passiven Bereich aber nicht erfüllt. Das Kriterium 2, Herabsetzung des örtlich am wenigsten negativen Ausgangspotentials  $U_0$  um mindestens 300 mV, ist erfüllt.

Das Kriterium 3, Depolarisation nach 4 Stunden an jeder Stelle größer als 100 mV, ist im aktiven Bereich erfüllt. Knapp verfehlt wird das Kriterium jedoch im passiven Bereich; aktive Bereiche depolarisieren schneller.

Obwohl keine Korrosion stattfindet, sind somit die Kriterien 1 und 3 formal nicht erfüllt. Das Erzwingen ihrer Forderungen in allen Bereichen — auch in den *passiven* Gebieten — würde jedoch zu übermäßig starker und unnötiger Vergrößerung der Schutzströme führen. Die Anwendung der Kriterien 1 und 3 *ausschließlich* auf die *aktiven* Bereiche — wie es das schematische Beispiel des Bildes 3.6 nahelegen würde — ist aus praktischen Gründen nicht hinnehmbar, denn das würde die genaue Kenntnis der örtlichen Lage aller korrosionsaktiven Bereiche voraussetzen. Gerade diese Flächen besitzen aber meist recht kleine Ausdehnung, wodurch sie bei Messungen mit üblichem Flächenraster leicht übergangen werden können (sie sind dann wegen der ungünstigen Flächenverhältnisse Anode zu Kathode um so gefährlicher!). Sicher aufzuspüren sind sie wohl nur mit ortsveränderlich eingesetzten, mobilen Meßelektroden. Das erfordert aber bei dem notwendigen engen Meßraster einen sehr hohen meßtechnischen Aufwand. Die Aussage von fest eingebauten Referenzelektroden allein ist sicherlich nicht ausreichend. Sie kann zu erheblichen Mißdeutungen führen, da das örtliche Auftreten von anodischen Bereichen nicht vorhersehbar ist, die Elektroden also für diese Anwendungen falsch plaziert sein können.

Das Kriterium 2 dagegen ist erfüllt. Für seine Anwendung gibt es keine Beschränkungen. Es zeigt sich bei diesen Betrachtungen als das geeignetste Kriterium. Auch aus praktischen Gründen ist ihm der Vorzug zu geben. Denn die meßtechnische

Erfassung der am wenigsten negativen, der noch passiven kathodischen Bereiche, ist erheblich leichter als die Aufspürung der kleinen aktiven anodischen Bereiche. Damit wird auch die Heranziehung der Aussage fest eingebauter Referenzelektroden erheblich sicherer.

Die Kriterien 1 und 3 gehen vom tatsächlichen Potential an der Phasengrenze Bewehrung/Betonelektrolyt aus. Dieses Potential läßt sich jedoch wegen der Spannungsfälle an den Durchtrittswiderständen der Elektroden und am Elektrolytwiderstand des Betons — zusammengefaßt als  $(I \cdot R)$ -Abfall bezeichnet — nicht unmittelbar messen. Als Äquivalent wird ihm daher das Potential sofort nach dem Ausschalten des Schutzstromes gleichgesetzt (Vergleiche Bild 3.7).

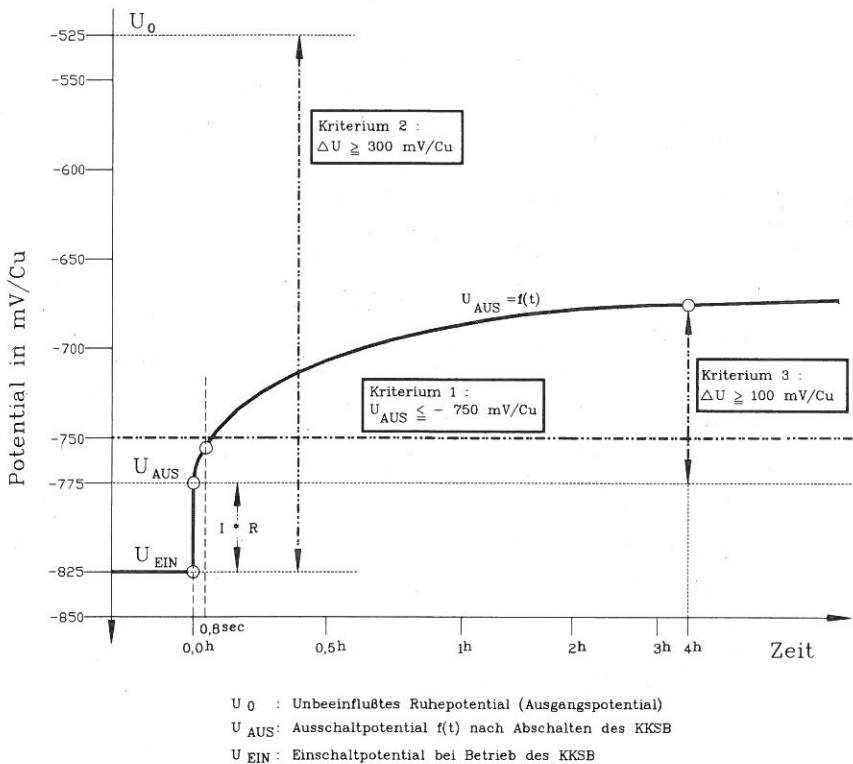


Bild 3.7 Potentialverlauf nach Abschaltung des KKSB  
Prinzip der Messung der Schutzwirkung

Die Messung dieser, im amerikanisch-britischen Schrifttum treffend „instant-off-potential“ genannten Ausschaltpotentiale, muß mit sehr schnell arbeitenden Geräten erfolgen. Wie das Bild aufzeigt, kann beispielsweise schon 0,8 sec. nach dem Ausschalten des KKSb eine Depolarisation, also eine Verschiebung zu positiveren Potentialwerten, von etwa 15 mV eingetreten sein. Würde die Messung erst zu dieser Zeit erfolgen, wären bereits 15 % des nachzuweisenden Schutzes gemäß Kriterium 3 (100 mV) verschenkt, d. h. die tatsächliche Einhaltung des Schutzkriteriums wäre besser als das Meßergebnis.

Neben diesem Zeit- bzw. Gerätefehler kann ein weiterer Fehler die Gleichsetzung des „Sofort-Aus-Potentials“ mit dem tatsächlichen Phasengrenzpotential beeinträchtigen. Mit dem Abschalten des Schutzstromes verschwindet zwar sein  $(I \cdot R)$ -Abfall sofort. Dieser Schutzstrom unterdrückt aber auch galvanische Ströme aus Elementbildung (Makroelemente unterschiedlicher Ursachen), die nach seinem Abschalten sofort wieder wirksam werden und ihre eigenen  $(I \cdot R)$ -Abfälle erzeugen. Grundsätzlich läßt sich dieser Fehler nicht vermeiden. Kleinhalten kann man ihn jedoch, wenn mit den Referenzelektroden — gleichgültig, ob fest eingebaut oder mobil — möglichst nahe an die Bewehrungsoberfläche herangegangen wird (ca. 10 mm). Da die Größe des Spannungsfalls vom Widerstand des gesamten, ausgedehnten Strompfades bestimmt ist, bleibt dieser restliche  $(I \cdot R)$ -Abfall vor der Elektrode meist vernachlässigbar. Für den Einsatz von mobilen Elektroden ist es aber zweckmäßig, Kernbohrungen für Meßstellen in der Deckschicht herzustellen und vorzuhalten.

Die Wirksamkeit des KKSb kann auch durch sogenannte Korrosions-Proben (englisch „corrosion-coupon“) nachgewiesen werden. Diese Proben liefern zwar nur ein qualitatives, dafür aber um so anschaulicheres Meßergebnis. Ein Stück Bewehrungsstahl, mit einem Meßkabel versehen, wird elektrisch isoliert mit Mörtel in Nähe der Bewehrung in die Betondeckschicht eingesetzt. Mit dem Meßkabel wird die Probe über ein empfindliches Strommeßgerät, mit Nullpunkt in der Mitte, mit dem Bewehrungsstahl zusammengeschaltet. Der Mörtel sollte stark chloridverseucht sein, um sicher zu gehen, daß die Probe gegenüber allen benachbarten Bereichen der Bewehrungsstähle anodisch reagiert wird. Ist die Probe anodisch, wird das Meßgerät sofort ausschlagen und damit einen positiven Korrosionsstrom anzeigen. Nach dem Einschalten des KKSb wird dieser Korrosionsstrom gegen Null zurückgehen, bei richtiger Einstellung des KKSb durch Umkehrung der Polarität sogar einen kleinen Schutzstrom anzeigen.

Die Wirksamkeit eines KKS, der nach den Kriterien 1 bis 3 bei der Inbetriebnahme richtig eingestellt wurde, muß auf Dauer aufrechterhalten werden. Das geschieht bei einfachen Anlagen mit netzbetriebenen Gleichrichtern, deren konstante Ausgangsspannung in Stufen oder stufenlos einstellbar ist. Wenn im Hafengebäude stark wechselnde Umgebungsbedingungen auftreten, z. B. im Tidebereich, müssen geregelte Gleichrichtergeräte eingesetzt werden. Es kommen zwei Arten von Geräten in Betracht:

— stromregelnd:

Der entsprechend Kriterium 2 ermittelte Schutzstrom ist Sollwert und wird konstant gehalten; das Potential ändert sich im wesentlichen mit der Änderung der Sauerstoffreduktion und der Temperatur. Unterschreitet das Einschaltpotential das Schutzpotential nach Kriterium 1 wesentlich — (I · R)-Abfall! —, erfolgt Potentialbegrenzung.

— potentialregelnd:

Das entsprechend Kriterium 1 oder 3 ermittelte Schutzpotential ist Sollwert und wird konstant gehalten; der abgegebene Schutzstrom ändert sich im wesentlichen mit der Änderung der Sauerstoffreduktion und der Temperatur. Überschreitet der Ausgangsstrom den nach Kriterium 2 ermittelten Schutzstrom, erfolgt Strombegrenzung.

Das stromregelnde Verfahren kann insbesondere während der Inbetriebnahme gewisse Vorteile bieten, zumal es auch auf festeingebaute Referenzelektroden als Istwert-Geber verzichtet, deren Langzeitstabilität meist unsicher ist. Lediglich für die Potentialbegrenzung werden solche Elektroden benötigt. Hierbei ist jedoch Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Meßwerte weniger kritisch.

Nach längeren, u. U. mehrjährigen Betriebszeiten zeigen sich Auswirkungen, die den Nachweis ausreichender Wirksamkeit des KKS beeinflussen können (siehe auch Bild 3.8):

- Der elektrische Summenwiderstand nimmt erheblich zu; das Regelsystem muß die treibende Spannung kräftig erhöhen, damit der notwendige Schutzstrom aufrecht erhalten werden kann.
- Weil die Potentialspitzen im Verlauf der Betriebsjahre abgebaut wurden, vollzieht sich die Depolarisation nach Abschaltung erheblich langsamer als kurz nach Inbetriebnahme des Systems. Nach endgültiger Depolarisation, die sich

über viele Tage hinziehen kann, zeigt das Ausschaltpotential (neues Ruhepotential!) einen Wert, der gleich oder sogar positiver ist als das Ausgangspotential  $U_0$  (altes Ruhepotential!) vor Einschaltung des KKSBS, gleiche Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit vorausgesetzt.

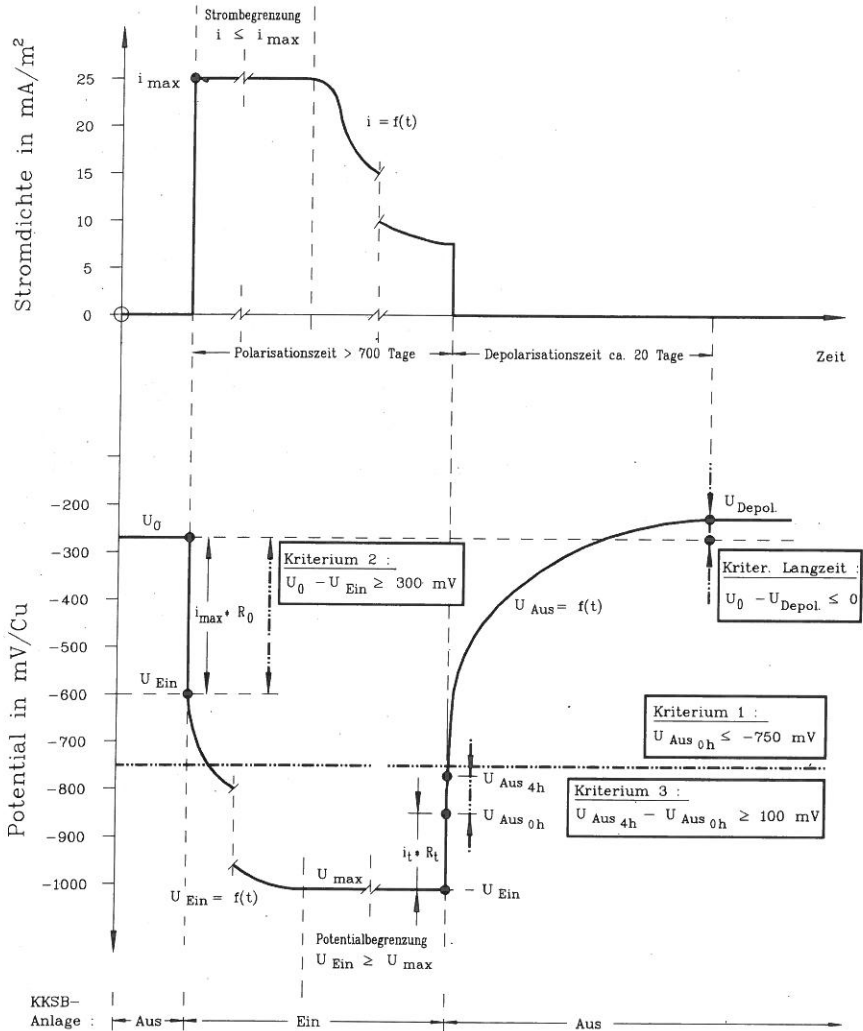


Bild 3.8 Langzeitwirkung des KKSBS  
Schematischer Verlauf von Schutzstromdichte und Potential

Diese langfristigen Auswirkungen des KKSB zeigen somit Veränderungen in der Elektrochemie des zu schützenden Systems an, die durch Abwanderungen von Chloridionen aus der Nachbarschaft der Bewehrung und durch Wiederherstellung der Alkalität an der Stahloberfläche zu erklären sind. Der Bereich der Passivität hat sich vergrößert, die Gefahr ihrer Beeinträchtigung durch eingewanderte Chloride hat sich verringert. Der Schutzstrom erfüllt seine Aufgabe, den Korrosionsstrom zu kompensieren.

Diese langfristigen Veränderungen sind aber auch ein überzeugendes Langzeitkriterium zum Nachweis der *dauerhaften* Wirkung des KKSB. Denn die zur Inbetriebnahme herangezogenen Schutzkriterien 2 und 3, nämlich Potentialverschiebung um mindestens 300 mV bzw. mindestens 100 mV Depolarisation nach 4 Stunden, sind mit zunehmender Betriebszeit immer weniger geeignet. Die 300 mV einschließlich ( $I \cdot R$ )-Abfall sind wegen des fallenden Schutzstromes infolge Vergrößerung des Summenwiderstandes zu eng gefaßt, die 4-Stunden-Depolarisationszeit ist viel zu kurz. Auch die Anwendung des Kriteriums 1, Unterschreitung eines Standard-Schutzpotentials, wird wegen der Problematik der standardmäßigen Festlegung eines solchen Grenzwertes für alle Umgebungsbedingungen nicht immer möglich, bzw. wegen dadurch zu hoch eingestellter Schutzströme nicht immer sinnvoll sein.

Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist bei Abnahme- und Übergabeverhandlungen von Bedeutung. Wesentlich ist der Nachweis, daß das Schutzsystem an jeder Stelle der Bewehrung ausreichend wirksam ist und wirksam war. Dieser Nachweis kann von der Herstellerfirma durch intervallmäßig oder kontinuierlich schreibende Messung der Potentiale und der Schutzströme im Rahmen einer Wartungsverpflichtung erbracht werden. In Zweifelsfällen können Messungen der Ausschaltpotentiale über die gesamte Depolarisationszeit – mindestens 20 Tage – Aufschluß geben. Das sich einstellende Depolarisationspotential sollte, unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen, gleich oder positiver sein als das Ruhepotential vor dem erstmaligen Einschalten des KKSB.

### 3.4 Festlegen der Systeme und der Schutzbereiche für den KKSB

Entsprechend den geometrischen Strukturen des Bauwerkes ist das wirksamste Anodensystem auszuwählen. Das derzeit gebräuchlichste System ist ein Streckmetallgitter aus metalloxidbeschichtetem Titan. Nur diese Bauform soll nachfolgend behandelt werden.



Die zu schützenden Bauwerkoberflächen müssen in unterschiedliche, voneinander getrennte Teilbereiche aufgeteilt werden, damit an allen Bewehrungsoberflächen in etwa gleiche Stromdichten zu erzielen sind. Diese Unterteilung ist somit abhängig:

- vom gewählten Anodensystem und dessen physikalischen Kenndaten
- von der geometrischen Struktur des Bauwerks und der Zugänglichkeit für Anbringung und Revision (z. B. bei wechselnden Wasserständen)
- von den äußeren Betriebsbedingungen, z. B. Tideeinfluß, Wasserstand, Schwall und Spritzwasseranfall, Trockenbereich und Beregnung
- vom örtlichen Chloridgehalt, auch aus Salzbelastungen durch Transport- und Lagervorgänge
- vom Bewehrungsgehalt und von der Betondeckung

Die gewählten Schutzbereiche und die äußeren Betriebsbedingungen des Bauwerkes bestimmen dann auch die Dimensionierung und örtliche Verteilung der zugehörigen Schutzgleichrichter und der erforderlichen elektrischen Verkabelung. Eine zusammengefaßte, zentrale Aufstellung aller Gleichrichter der einzelnen Schutzbereiche führt meist zu langen und teuren Kabelwegen. Andererseits ist eine dezentralisierte Aufstellung der Gleichrichter, dem örtlichen Schutzbereich zugeordnet, betriebsbedingt meist undurchführbar (die Gleichrichterschränke würden die Transport- und Ladevorgänge stören) oder sehr kostenaufwendig wegen Unterfluraufstellung, Kapselung o. ä. Durch Abwägung der Kosten sind optimale Lösungen zu suchen. Die gewählten Schutzbereiche und die vorgefundenen Betonschädigungen bestimmen die Auswahl und die Anbringungsorte von Bezugselektroden (Referenzelektroden) zur Überwachung und eventuellen Regelung des jeweiligen Schutzbereiches. Diese Elektroden sind reine Meßelektroden, die das augenblickliche Potential an der Oberfläche des Bewehrungsstahles erfassen. Für diese Aufgabe stehen Graphit-, Ag/AgCl-Elektroden, Cu/CuSO<sub>4</sub>-Feststoffelektroden u. a. zur Verfügung.

### 3.5 **Metallenleitende Durchverbindung der Stahlteile im Beton**

Der KKSb setzt eine metallenleitende Verbindung der Bewehrung voraus. Dies kann auch bei verrödelten Stahlbeton-

bewehrungen gegeben sein, sie ist aber jedenfalls — und bei verrödelten Verbindungen immer wieder — durch Widerstandsmessungen an den Bewehrungskörben eines Schutzbereichs zu überprüfen.

Dazu muß die Bewehrung an verschiedenen, weit auseinander gelegenen Stellen zugänglich sein, an denen einwandfreie, metallleitende Kontaktstellen herzustellen sind. Schleifenwiderstände größer als  $0,5 \Omega$  weisen auf mangelhafte Verbindungen hin. In diesen Fällen ist die Bewehrung ausreichend durchzuverbinden. In einfacher Weise kann dies durch Lichtbogenschweißung erfolgen, da Betonstähle hierfür geeignet und zugelassen sind. Ist das bei älteren, bzw. ausländischen Betonstählen nicht der Fall (hochgekohlte Stähle höherer Festigkeit, verzinkte Stähle), bieten sich an den Kreuzungspunkten Schellen mit Keilschrauben zur Herstellung der Durchverbindung an.

### 3.6 Vorbereiten des schadhaften Betons

Die Betonflächen müssen vor Aufbringung des Deckmörtels auf den schadhaften Beton vorbereitet werden.

Vor Installation von Fremdstromanodensystemen muß der lockere Altbeton entfernt werden. Auch hohl klingender Deckbeton über korrodierter Bewehrung ist abzutragen. Ansonsten müssen alle Betonbereiche, in denen die Abrißfestigkeit kleiner ist als  $1,5 \text{ N/mm}^2$ , entfernt werden. Dies kann zweckmäßig durch Hochdruckwasserstrahlen oder durch Naß-Sandstrahlen ausgeführt werden. Trockenstrahlen kann entfallen. Eine ausreichende Rauigkeit für den Haftverbund des aufzubringenden Spritzbetons ist zu gewährleisten. Risse im Beton sind, soweit möglich, auszustemmen und mit Mörtel zu verpressen. Großflächige Schädigungen des Altbetons sind bis zur äußeren Bewehrungslage zu entfernen, das gilt besonders für karbonatisierten Beton.

Als nächstes werden die Kathodenanschlüsse, an denen später die Minuskabel der Schutzgleichrichter angeschlossen werden und die davon getrennten Meßanschlüsse, an denen die Minusmeßkabel der Referenzelektroden angeschlossen werden, vorbereitet. Am einfachsten ist das Aufschweißen von Rund- und Flacheisen an die Bewehrungsstäbe. Anzahl und örtliche Verteilung sind abhängig von den gewählten Schutzbereichen und ihrer Dimensionierung, sowie auch von den Möglichkeiten der äußeren Kabelverlegung. Während nicht jedem

Schutzbereich immer ein eigener Kathodenanschluß zugeordnet werden muß, vielmehr eine gruppenweise Zuordnung benachbarter Schutzbereiche möglich ist, erhält jeder Bereich mindestens einen, bei ausgedehnten und konstruktiv unterschiedlichen Teilbereichen auch mehrere Meßanschlüsse. Die vorausgegangene Messung der metalleitenden Durchverbindung der Bewehrung ist dabei eine wertvolle Entscheidungshilfe.

Die freigelegte Bewehrung ist jetzt mit einer Mörtelschicht von mindestens 1 cm Dicke abzudecken; Übergänge zum Altbeton sind sauber abzuziehen. Dies kann von Hand durch Spachteln erfolgen, bei großflächigen Sanierungen und Untersichten auch durch Betonspritzen.

Es muß sichergestellt sein, daß Risse aufgefüllt sind und die Bewehrung sicher und völlig abgedeckt (isoliert!) ist. Die Kabelanschlüsse sind ebenfalls durch Spachtelmörtel zu schützen. Die Übergänge zum Altbeton müssen sauber und rißfrei sein. Das Ergebnis ist durch Abnahmeprotokolle festzuhalten.

Wegen der notwendigen elektrischen Leitfähigkeit sind nur reine Zementmörtel zu verwenden; die Rezeptur und die Einhaltung der vorgeschriebenen Einbaufrist ist ebenfalls zu dokumentieren.

### 3.7 Einbau der Bezugselektroden (Referenzelektroden)

Nach der Vorbereitung der Betonflächen müssen die Bezugselektroden eingebaut und verkabelt werden. Je nach gewähltem Elektrodentyp werden Kernbohrungen im Altbeton erstellt, in die die Elektroden in einem Abstand von etwa 10 mm von einem Bewehrungsstahl mit einem Zementmörtel eingesetzt werden. Das Elektrodenkabel wird angeschlossen und gemeinsam mit dem Minus-Meßkabel unter Putz oder in vorbereitetem Schutzrohr zu einem Meßkasten oder Meßschrank geführt. Die Auswahl des Elektrodenstandortes erfordert große Erfahrung, bestimmt sie doch die spätere Funktionssicherheit der Schutzanlage entscheidend. Wenn irgend möglich, sollten die Elektroden im Altbeton, also in Bereichen, wo die Decklage nicht entfernt wurde, angebracht werden (Entfernung vom sanierten Betonbereich mindestens 50 cm). Müssen die Elektroden in sanierte Bereiche eingebaut werden, da überall der geschädigte Deckbeton entfernt wurde, können bei Inbetrieb- und Abnahme Unstimmigkeiten auftauchen, weil das Schutzkriterium nicht ausreichend erkannt wird.

Wird in diesen Fällen von den im Abschnitt 3.3 beschriebenen „Korrosions-Proben“ zur qualitativen Überwachung des Schutzes Gebrauch gemacht, so werden diese, ähnlich wie die Referenzelektroden, mit einem chloridangereicherten Zementmörtel in der Nähe der Bewehrung eingebettet.

### 3.8 Einbau der Anoden und Aufbringen des Deckbetons

Die Anoden, z. B. aus metalloxid-beschichtetem Titanstreckmetall, werden auf die vorbereitete Betonfläche aufgebracht und mit eingebohrten Kunststoffdübeln fixiert. Die einzelnen Streckmetallgitter werden durch Lichtbogenschweißung miteinander zu dem geplanten Schutzbereich verbunden, je nach Größe und Anzahl zur Erhöhung der Längsleitfähigkeit auch mit zusätzlichen Titanstäben versehen. Größe, Anzahl und geplante Stromabgabe des Schutzbereiches bestimmen auch die Plus- bzw. Anodenanschlüsse. Bei ausgedehnten und konstruktiv unterschiedlich gestalteten Schutzbereichen (z. B. Balken, Platten) ist es zweckmäßig, mehrere Anodenanschlüsse je Schutzbereich vorzusehen. Bei mehr als 3 Stück je Schutzbereich sind diese durch Kabel zu einem Ringnetz zusammenzuschalten, dessen beide offenen Enden zum Gleichrichter geführt werden.

Vor Aufspritzen des Deckbetons ist anhand einer Checkliste zu kontrollieren, bzw. sicherzustellen, daß

- keine metallenen Kontakte zwischen den Anoden und den Stahlteilen im Beton (dazu gehören auch Anker, Träger und Gründungkörper aus Stahl sowie die Minus-Anschlüsse für Gleichrichter und Meßelektroden) zu Kurzschlüssen führen,
- kurzschlußgefährdete Stellen protokolliert und so ausgebildet werden, daß sie während und nach dem Aufbringen der Deckschicht durch Widerstandsmessungen geprüft werden können,
- die Messung der „natürlichen“ Potentiale aller Bezugslektroden erfolgt ist (Ausgangspotential, Ruhepotential  $U_0$ ), soweit sie im Altbeton eingebaut wurden,
- freiliegende Stahlteile, die zeitweise ins Meerwasser eintauchen, entweder entfernt oder nach beiden Seiten (Meerwasser und Beton) durch Beschichtungen isoliert werden (vergleiche Abschnitt 5).

Dann kann der Deckbeton aufgebracht werden. Als Deckschichten kommen nur Mörtel in Frage, die einerseits das Ausgasen der Betonoberfläche, andererseits auch die mindest erforderliche Leitfähigkeit des Betonporenwassers als Elektrolyt gewährleisten. Der aufgebrachte Mörtel (z. B. Spritzbeton) muß das Anodensystem vollständig überdecken. Üblicherweise werden Schichtdicken von 25 bis 30 mm aufgebracht.

Der kathodische Korrosionsschutz sollte nicht vor Erreichen der geforderten Betonfestigkeit (14 bis 28 Tage) eingeschaltet werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Betonoberflächen nach Aufbringen der Decklage 7 Tage feucht gehalten werden.

### 3.9 Zweckmäßige Stromquellen

Da Opferanoden im allgemeinen keine ausreichende Ergiebigkeit und keine Regelungsmöglichkeit haben, werden für den KKS im Hafen- und Meerwasserbau fast ausschließlich vom öffentlichen Netz gespeiste Gleichrichter als Stromquellen verwendet. Die äußeren Betriebsbedingungen bestimmen die Auswahl der Betriebsart — z. B. spannungskonstant gesteuert, potentialregelnd, stromregelnd — und die Dimensionierung.

Für Schutzbereiche, deren Betondurchfeuchtungen und Leitfähigkeiten nur wenig und langsam veränderlich sind, genügen fest einstellbare Schutzgleichrichter mit konstanter Ausgangsspannung.

Bei starken Leitfähigkeitsschwankungen (z. B. Tidebereich, Spritzwassergürtel, Windstau, Trockenperioden) sind regelbare Schutzgleichrichter erforderlich.

Beim Einsatz von beschichteten Titananoden aus Streckmetall sind individuelle Gleichrichter mit z. B. 3 Ampere und 12 Volt zweckmäßig, die so gesichert werden, daß eine ungewollte Umpolung verhindert wird. Gleichrichter auf Kais und Pieranlagen können überflutungssicher gekapselt werden.

Als Stromquelle kann bei bestimmten örtlichen Bedingungen und entsprechenden Klimata auch Sonnenenergie in Frage kommen.

### 3.10 Inbetriebnahme und Kontrolle

Der Betrieb kathodischer Korrosionsschutzanlagen auf Bereichen einer Pier- bzw. Kaianlage unterliegt aufgrund der Vor-

geschichte, der weiteren Exposition und der Nachbarschaft zu noch nicht sanierten Bereichen, bestimmten Verhaltensregeln für den optimalen Schutz. Diese müssen nach dem Einbau und der Abnahme in einer Betriebsanweisung dem Betreiber als Vertragsbestandteil übergeben werden. Dazu gehören die vereinbarten Meß- und Protokollformulare. Etwaiges Betriebspersonal des Betreibers ist einzuweisen.

Kontrollmessungen an möglichst ungünstigen Stellen sind innerhalb der Gewährleistungsfrist (z. B. 2 Jahre) vom Errichter vorzunehmen. Zweckmäßigerweise wird dazu ein Wartungsvertrag mit dem Errichter abgeschlossen (vergleiche Abschnitt 3.3).

Für Schutzbedingungen in Übergangsbereichen zu noch nicht sanierten Abschnitten sind Sonderregelungen zu treffen.

In den Teilbereichen des Schutzobjektes ist die beginnende Polarisation durch abfallenden Schutzstrom (bei konstanter treibender Spannung bzw. konstant geregelttem Potential) oder negativer werdendem Potential (bei konstant geregelttem Schutzstrom) spätestens nach 1 Monat zu erkennen.

Die erste Kontrollmessung ist z. B. nach 2 Monaten durchzuführen. Anhand einer Checkliste sind folgende Positionen zu überprüfen:

- Funktion der Schutzstromgeräte, Ausgangsspannung und -strom
- Ströme der Schutzanoden
- Einschalt- und Ausschaltpotentiale fest eingebauter und/oder mobiler Bezugselektroden sofort nach Abschaltung und nach 4 bzw. 5 oder 24 Stunden (vergleiche Abschnitt 3.3), insbesondere an Stellen, die eine geringere Schutzstrombeaufschlagung erwarten lassen
- Übergangswiderstände zwischen Anoden und Kathoden
- Betriebsparameter (Temperatur, Feuchtigkeit, Wasserstand, Schiffe)

Nach Ablauf der Gewährleistung kommen für Kontrollmessungen folgende Zeitabstände in Frage:

- bei nicht regelnden Schutzanlagen: 1 Jahr
- bei regelnden Schutzanlagen: 1/2 Jahr

Bei größeren und technisch aufwendigen Überbauten ist besonderes Augenmerk auf die Problemzone an der Einbindung des stählernen Unterbaues in den Beton zu richten (vergleiche Abschnitt 5).

### 3.11 **Kosten und Wirtschaftlichkeit**

Der kathodische Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls in Hafengebäuden ist eine Sonderfertigung in Maßarbeit und gestattet keine allgemeingültigen Kostenangaben.

Entsprechend Abschnitt 3.2 wird man KKSB nur dann anwenden, wenn durch andauernde Chlorideintragung Korrosionsschäden am Betonstahl nicht zu verhindern sind. Dabei zeigt der KKSB seine wirtschaftliche Überlegenheit gegenüber den betontechnologischen Instandsetzungsmethoden. Nur durch den KKSB kann das Schutzobjekt dauerhaft vor Korrosion bewahrt werden.

Bei Sanierungen mit rein betontechnologischen Maßnahmen ist durch umfangreiche Erfahrungen die Kostensituation bekannt; diese wird mit ca. 100 bis 250 DM/m<sup>2</sup> sanierter Betonoberfläche angegeben. Die Instandsetzung eines Bauwerkes mit KKSB ist dagegen von der Kostenseite schwerer zu übersehen. Die anfallenden Kosten sind sehr stark von der Größe der vorgefundenen Schädigungen abhängig. Sind bereits großflächige Abplatzungen und tiefgehende, breite Risse aufgetreten, erhöhen sich die Sanierungskosten erheblich durch den notwendigen Abtrag nicht mehr festhaftender alter Deckschichten und dem notwendigen Aufbau einer die Bewehrung abdeckenden neuen Deckschicht vor Einbau der Anodengitter (vergleiche Abschnitt 3.6). Auch die örtlichen Betriebs- und Umgebungsbedingungen haben erheblich Einfluß auf die Gesamtkosten, bestimmen sie doch Auswahl und Dimensionierung der Gerätetechnik — spannungskonstant gesteuert, strom- und potentialregelnd — und der zugehörigen Meßtechnik. Es muß daher mit einer großen Schwankungsbreite der Sanierungskosten bei Anwendung von KKSB gerechnet werden, von etwa 100 bis 400 DM/m<sup>2</sup> sanierter Betonoberfläche.

Für den KKSB fallen auch Betriebskosten an. Wegen der geringen elektrischen Leistung können die Stromkosten allerdings vernachlässigt werden. Die Betriebskosten für die regelmäßigen Wartungen und Kontrollmessungen dürfen dagegen nicht vernachlässigt werden. Sie können aber wegen der Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten der Schutzobjekte, der Betriebsabläufe und der Meßprogramme allgemeingültig nicht angegeben werden.

Der Mehraufwand einer Sanierung mit KKSBB ist somit beträchtlich. Es muß mit bis zu 160 % der Kosten gerechnet werden, die bei betontechnologischen Maßnahmen herkömmlicher Art entstehen. Dennoch kann dieser Mehraufwand durch Verlängerung der Nutzungsdauer des Bauwerkes gerechtfertigt sein: er *fällt nur einmal* an.

Dagegen werden bei Korrosionsangriffen durch Meerwasser die notwendigen Sanierungen mit rein betontechnologischen Maßnahmen wiederholt anfallen und von Mal zu Mal schwieriger werden, was zu einem vorzeitigen Abbruch des Bauteils führen kann.

### 3.12 Beispiel einer Großanlage

Im Hafen MINA ZAYED, ABU DHABI, wurden reichlich 11 000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen durch KKSBB geschützt [8]. Die Bilder 3.9. geben einen Überblick über die Anlage.

Die zu schützende Pieranlage besteht im wesentlichen aus vorgefertigten Balken und Platten, bei deren Herstellung rigorose Qualitätsanforderungen eingehalten wurden.

Herstellungszeit:	1971 bis 1978
Wasser-Zement-Wert:	< 0,45
Chloridgehalt:	0,01 bis 0,06 M-% bezogen auf Betongewicht
Betondeckung:	60 mm, teilweise 80 mm (!)

Die Balken tauchen einige Male im Monat (bei den höchsten Tiden) in das Meerwasser ein. Unter der Pierplatte stellten sich fast konstante Temperaturen von etwa 40° C bei annähernd 100 % relativer Luftfeuchtigkeit ein, konstruktiv bedingt durch stark behinderten Luftaustausch.

Unter diesen Betriebsbedingungen zeigten sich bereits 6 Jahre nach Fertigstellung die ersten tiefen Risse und Abplatzungen der Betondeckung, die zu intensiven Untersuchungen und Sanierungsvorschlägen führten, aber keine Reparaturen auslösten. In den Folgejahren wurden die Abplatzungen großflächiger, besonders an den Unter- und Seitensichten der Balken, wo in Extremfällen fast die gesamte Betondeckung abgesprengt wurde.

Hier wurden Chloridgehalte bis zu 0,39 M-%, bezogen auf das Betongewicht, und Potentiale bis - 650 mV/Cu gemessen. Diese Schäden zwangen zu Sanierungsmaßnahmen an den Balken, für die KKSBB gewählt wurde. Die Installationen begannen 1988, die Gesamtanlage wurde 1990 in Betrieb genommen.



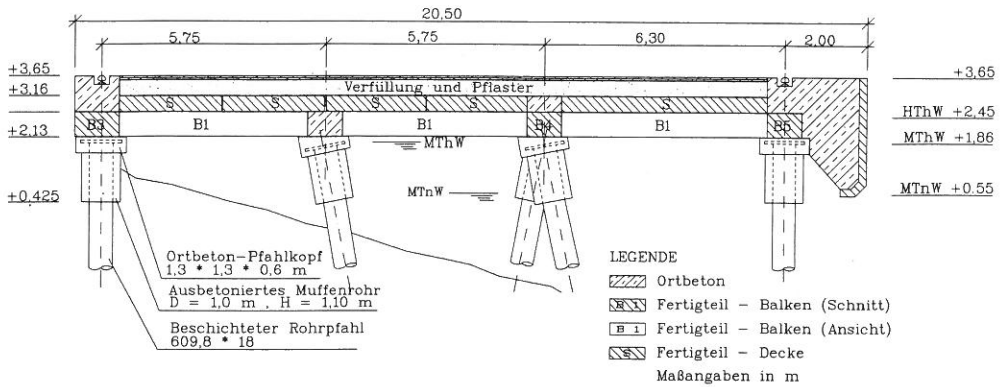


Bild 3.9.1 Typischer Pierquerschnitt

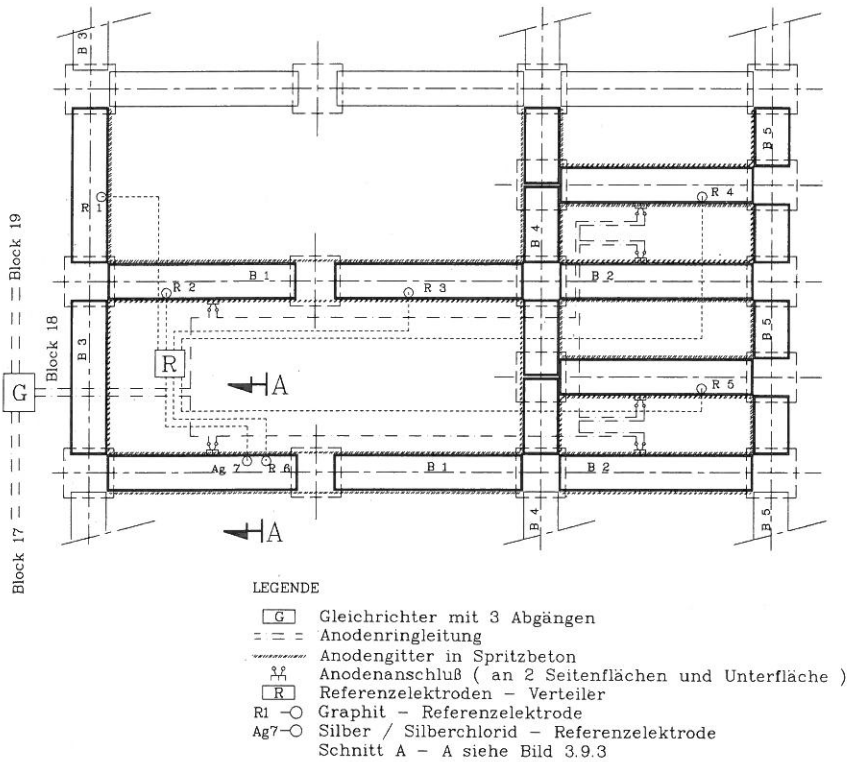


Bild 3.9.2 Draufsicht auf das tragende Balkenrost mit Anodengittern und Referenzelektroden für einen Block.

In den Bildern 3.9.2 und 3.9.3 ist die typische Ausführung des Korrosionsschutzes dargestellt.

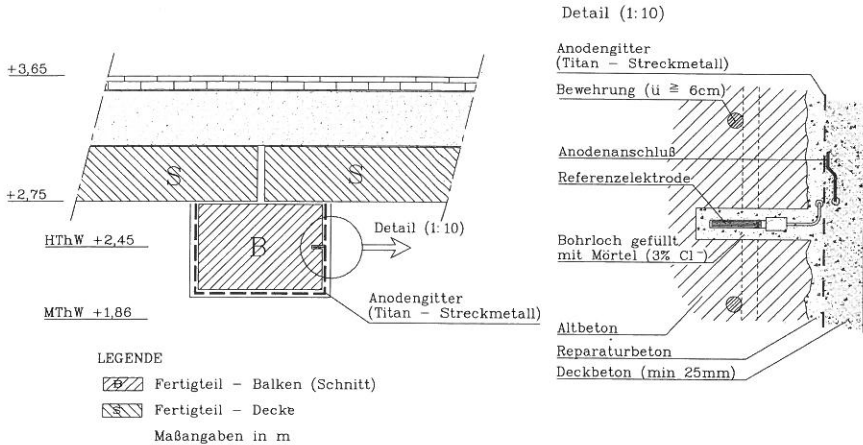


Bild 3.9.3 Detail-Querschnitt

Der Pieranlage ist eine Vielzahl von unabhängigen Gleichrichteranlagen zugeordnet. Jeder Gleichrichter speist 3 voneinander unabhängige Schutzblöcke oder Schutzkreise. Die Einspeisung des Schutzstromes in die einzelnen Anodengitter erfolgt über 2 als Ringleitung geschaltete Anodenkabel (Pluskabel).

Die Meßkabel der jeweiligen Referenzelektroden eines Blockes sind zu einem Verteiler geführt. Ihre Signale werden von hier über Mehraderkabel zur Meß- bzw. Überwachungsstation geführt. Als Referenzelektroden werden überwiegend Graphitelektroden verwendet. Zur Erhöhung der Meßsicherheit ist aber jedem Schutzkreis mindestens eine zusätzliche Silberchloridelektrode beigeordnet.

An vier durchgehenden Bewehrungsstähen ist der Minusananschluß, der Kathodenanschluß, hergestellt. Durch die Verbindung mit zwei als Ringleitung geschalteten Kathodenkabeln (nicht dargestellt), erfolgt die Rückleitung des Schutzstromes zum Gleichrichter. Zwei weitere Kabel sind an die Bewehrungsstähe angeschlossen, als Rückleitung zur Übertragung der Stahlpotentiale zu dem oben erwähnten Meßverteiler.

Nach dem Entfernen schadhafter Betondeckungen sind die Balken mit Spritzbeton saniert worden. Um die so reparierten

Balken wurden U-förmig Anodengitter aus metalloxid-beschichtetem Titan angelegt und mit Kunststoffdübeln unten und seitlich fixiert. Die auf passende Längen geschnittenen Anodengitter wurden durch Punktschweißung elektrisch leitend miteinander verbunden. Die Kabelanschlüsse zur Stromversorgung der Anodengitter wurden ebenfalls durch Punktschweißung hergestellt und die Kabel auf den Haltedübeln der Gitter an den Balkenseiten befestigt.

Jedem Balken sind Referenzelektroden zugeordnet, die in Bohrlöchern eingebracht wurden. Die Bohrlöcher wurden mit chloridangereichertem Mörtel (3 M-%  $\text{Cl}^-$ ) vergossen. Diese Meßelektroden wurden im Abstand von etwa 10 mm von der Bewehrung im Altbeton (soweit noch vorhanden) angeordnet, wenn möglich mehr als 50 cm von sanierten Betonbereichen entfernt. An einigen großflächigen geschädigten und entsprechend aufwendig sanierten Bereichen mußten die Elektroden jedoch in den Reparaturbeton eingebettet werden. Die Meßelektroden waren werkseitig mit ausreichend langen Meßkabeln versehen, die ähnlich wie die Anodenkabel auf den Fixierungsdübeln verlegt wurden.

Alle Kabel wurden einzeln verlegt, im Abstand von etwa 25 mm voneinander, um die nachfolgende Aufbringung des Spritzbetons zu erleichtern. Im Anschluß daran wurden die so ausgerüsteten Balkenflächen mit einer mindestens 25 mm dicken Spritzbetonschicht überdeckt.

Sämtliche Sanierungs- und Installations-Arbeiten mußten als Tide-Arbeit ausgeführt werden, wodurch die Ausführung außerordentlich erschwert und verlängert wurde.

Als Schutzkriterien wurden angewandt:

- 100 mV/Cu Depolarisation nach 5 Stunden
- 120 mV/Cu Depolarisation nach 25 Stunden

An Stellen, an denen diese Kriterien nicht erreicht werden konnten — überwiegend sanierte Bereiche in Nachbarschaft zu Alt-Bereichen — wurden Potentialabsenkungen von 300 mV/Cu als ausreichend angesehen oder die Aussagen der „corrosion coupon“, der Korrosionsproben, als zufriedenstellend herangezogen. Die zur Einhaltung dieser Kriterien erforderlichen Schutzströme nach erfolgter Polarisation lagen zwischen 2 und 18 mA/m<sup>2</sup> Stahl-Oberfläche.

## 4 **KKSB als Vorsorgemaßnahme für korrosionsgefährdete Neubauten**

### 4.1 **Ausgangssituation und allgemeine Indikationen**

Die erforderliche Lebensdauer eines Betonbauwerks kann bei Vorliegen der in den Abschnitten 1 und 3 angeführten Korrosionskriterien durch die Anbringung eines kathodischen Korrosionsschutzes KKSB sichergestellt werden.

Eine spätere Installation des KKSB bei aufgetretenen Korrosionsschäden soll nicht rechtzeitig erkannte Schadensursachen auf elektrischem Wege ausschalten. Die vorsorgliche Installation des KKSB dagegen verhindert von Anfang an das Auftreten von Korrosionsschäden, bedeutet aber zusätzliche Herstellungskosten.

Diese zusätzlichen Herstellungskosten sind aber in jedem Falle geringer als die Kosten einer späteren Sanierung. Es entfallen z. B. die Kosten der Schadensanalyse, das Wegnehmen des schadhaften Betons, die Behinderung des Betriebes auf der Gesamtanlage. Es entfallen aber auch die Kosten, die zur Behebung und Kontrolle der Korrosionsströme aus sich bildenden galvanischen Elementen zu erwarten sind, z. B. zwischen sanierten und nicht sanierten Bereichen, zwischen chloridbeaufschlagten und chloridfreien Bereichen.

Dazu kommt, daß — bei späterer Sanierung — am Bauwerk bleibende Schäden in Form von Querschnittsschwächungen und Korrosions-Kerben in Kauf genommen werden müssen.

Bei gleichzeitig vorgesehenem kathodischen Schutz des stählernen Unterbaues (Spundwand, Stahlpfähle), können beide Systeme aus gemeinsamen Anlagen versorgt werden und zweckmäßigerweise vom gleichen zugelassenen Unternehmen geplant und ausgeführt werden. Vorteile bei der Verlegung und Wahl der Anodensysteme können hinzukommen.

Anoden an Untersichten über dem Wasser sind nachträglich mit vertretbarem Aufwand nicht applizierbar.

Die *Indikation* für die Anwendung von KKSB ist gegeben, wenn mit Chloridverseuchung zu rechnen ist,

- z. B. durch Meerwasserbenetzung, bevorzugt der Wetterseite ausgesetzte senkrechte Flächen im Tide- und Spritzwasserbereich
- z. B. durch Stein- und Kalisalzumschlag
- z. B. durch hohe und wiederkehrende Tausalzbelastung auf befahrenen Flächen.

Die Indikation zur Anwendung verstärkt sich bei hohen mittleren Luftfeuchtigkeiten und hohen mittleren Umgebungstemperaturen – eine Erhöhung um 10° C kann eine Zunahme des Korrosionsstromes auf 150 % bis 200 % bewirken.

#### 4.2 **Vorbereiten der Bewehrung, elektrische Installation**

Die für die Wirksamkeit des KKSBS entscheidende Voraussetzung, gute und durchgängige Leitfähigkeit des gesamten Bewehrungskorbes, läßt sich bei Neubauten leicht und ohne erhöhten Aufwand verwirklichen. Einschränkungen, wie sie bei Sanierungsarbeiten zwangsweise auftreten, wie Zugänglichkeit, Unkenntnis der Bewehrungshäufigkeit, der Betondeckung und ihrer Toleranzen usw. gibt es bei Neubauten nicht.

Die notwendigen Schweißverbindungen im Bewehrungskorb können bereits in die Bewehrungspläne eingearbeitet werden. Die Auswahl der örtlichen Schweißpunkte erfolgt nur entsprechend den technischen Anforderungen. Das gilt auch für die Ortswahl und die Herstellung der Kathodenanschlüsse zur Stromeinleitung und Anschluß der Referenzelektroden, die optimal den Bereichen mit hohem Bewehrungsindex zugeordnet werden können. Selbst die Verlegung der Kathoden-, Anoden- und Meß-Kabel kann in einfachster Weise vorgeplant und auf der Baustelle ausgeführt werden, um ihnen im Beton einen sicheren Halt und mechanischen Schutz zu geben, ohne auf Schutzrohre oder sonstige Hilfsmittel angewiesen zu sein. Bei geeigneten Bauformen können sogar die Referenzelektroden unmittelbar an den Stählen angebracht und angeschlossen werden.

Das gesamte elektrische System des KKSBS läßt sich in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Bauingenieur und Korrosionsschutzingenieur an Hand der Bewehrungspläne auf die besonders gefährdeten Bereiche hin optimal auslegen und auf der Baustelle nach Abschluß der Armierungsarbeiten und vor dem Betonieren verwirklichen.

#### 4.3 **Einsatz der Anoden**

Die heute verfügbaren Anodensysteme sind für *Sanierungsmaßnahmen* entwickelt worden und haben sich in diesem Einsatzgebiet bewährt. Ihre Anwendung bei Neubauten zum vorsorglichen Schutz erfordert besondere Maßnahmen, z. T. auch konstruktive Modifizierungen (Steifigkeit, Maschenweite). Bei der Planung eines kathodisch zu schützenden Neubaus kann

die Gefahr eines Kurzschlusses zwischen Bewehrung und Anode bereits durch zweckmäßige konstruktive Gestaltung der Anodensysteme, der Montagesysteme und der Betoneinbaumethode minimiert werden, wobei vor allem der rauhe Baustellenbetrieb in die Betrachtung einzubeziehen ist.

Für Untersichten und Seitenansichten bietet es sich an, die Anode in Form eines Streckmetallgitters aus metalloxidbeschichtetem Titan als Bewehrung einer 4 bis 6 cm dünnen Fertigteilplatte einzubauen. Diese Fertigteilplatte dient als verlorene Schalung, ihr Verbund mit dem Ortbeton ist allein durch die Oberflächenrauhigkeit oder mit Kunststoffdübeln herzustellen, damit ein Kontakt zwischen Anode und Bewehrung ausgeschlossen ist. Wo ein Einsatz von Fertigteil-Schalenelementen nicht möglich ist, kann durch Verwendung von Spezialabstandhaltern aus Polyethylen oder Faserbeton, die noch zu entwickeln und zu erproben sind, ein sicherer Zwischenraum zwischen Bewehrung und Anode, sowie zwischen Anode und Schalung eingehalten werden. Die Steifigkeit des Anodengitters und die Abstände der Abstandhalter sind aufeinander abzustimmen. Eventuell muß jeder Bewehrungsknotenpunkt erfaßt werden, bzw. sind Linienabstandhalter einzusetzen.

Vorstellbar ist auch die Entwicklung einer mit Faserbeton umhüllten Draht- oder Stabanode, wobei die Betonhülle als Abstandhalter zwischen Bewehrung und Schalung dient. Diese Anoden könnten bei Längen von 2 bis 10 m durch Schweißung verbunden werden.

An horizontalen Aufsichtflächen (Kaipplatten) ist das im Abschnitt 3 (Sanierung) beschriebene Verfahren der Verlegung von Anodengittern auf einem Isoliermörtel über der obersten Bewehrungslage zweckmäßig. Zur Verbesserung des Verbundes und Vermeidung von Rissen kann das Anodengitter kurz nach dem Ansteifen des Ortbetons direkt auf die sorgfältig mit genügender Überdeckung hergestellte, aufgerauhte Oberfläche aufgelegt und „frisch in frisch“ mit Deckbeton (evtl. Splittbeton oder Estrichmörtel) einbetoniert werden.

Bei allen Einbaumethoden muß auf der Baustelle mit größter Sorgfalt vorgegangen werden. Durch Widerstandsmessungen — auch während des Betonierens (Warnsignale!) — muß sichergestellt werden, daß keine Kurzschlüsse vorhanden sind oder entstehen. Alle zu ihrer Verhinderung gemachten Aufwendungen zahlen sich aus, denn entstandene Kurzschlüsse sind schwer und nur mit aufwendigen elektrischen Flächen-

Balken wurden U-förmig Anodengitter aus metalloxid-beschichtetem Titan angelegt und mit Kunststoffdübeln unten und seitlich fixiert. Die auf passende Längen geschnittenen Anodengitter wurden durch Punktschweißung elektrisch leitend miteinander verbunden. Die Kabelanschlüsse zur Stromversorgung der Anodengitter wurden ebenfalls durch Punktschweißung hergestellt und die Kabel auf den Haltedübeln der Gitter an den Balkenseiten befestigt.

Jedem Balken sind Referenzelektroden zugeordnet, die in Bohrlöchern eingebracht wurden. Die Bohrlöcher wurden mit chloridangereichertem Mörtel (3 M-%  $\text{Cl}^-$ ) vergossen. Diese Meßelektroden wurden im Abstand von etwa 10 mm von der Bewehrung im Altbeton (soweit noch vorhanden) angeordnet, wenn möglich mehr als 50 cm von sanierten Betonbereichen entfernt. An einigen großflächigen geschädigten und entsprechend aufwendig sanierten Bereichen mußten die Elektroden jedoch in den Reparaturbeton eingebettet werden. Die Meßelektroden waren werksseitig mit ausreichend langen Meßkabeln versehen, die ähnlich wie die Anodenkabel auf den Fixierungsdübeln verlegt wurden.

Alle Kabel wurden einzeln verlegt, im Abstand von etwa 25 mm voneinander, um die nachfolgende Aufbringung des Spritzbetons zu erleichtern. Im Anschluß daran wurden die so ausgerüsteten Balkenflächen mit einer mindestens 25 mm dicken Spritzbetonschicht überdeckt.

Sämtliche Sanierungs- und Installations-Arbeiten mußten als Tide-Arbeit ausgeführt werden, wodurch die Ausführung außerordentlich erschwert und verlängert wurde.

Als Schutzkriterien wurden angewandt:

- 100 mV/Cu Depolarisation nach 5 Stunden
- 120 mV/Cu Depolarisation nach 25 Stunden

An Stellen, an denen diese Kriterien nicht erreicht werden konnten — überwiegend sanierte Bereiche in Nachbarschaft zu Alt-Bereichen — wurden Potentialabsenkungen von 300 mV/Cu als ausreichend angesehen oder die Aussagen der „corrosion coupon“, der Korrosionsproben, als zufriedenstellend herangezogen. Die zur Einhaltung dieser Kriterien erforderlichen Schutzströme nach erfolgter Polarisation lagen zwischen 2 und 18 mA/m<sup>2</sup> Stahl-Oberfläche.

## 4 **KKSB als Vorsorgemaßnahme für korrosionsgefährdete Neubauten**

### 4.1 **Ausgangssituation und allgemeine Indikationen**

Die erforderliche Lebensdauer eines Betonbauwerks kann bei Vorliegen der in den Abschnitten 1 und 3 angeführten Korrosionskriterien durch die Anbringung eines kathodischen Korrosionsschutzes KKSB sichergestellt werden.

Eine spätere Installation des KKSB bei aufgetretenen Korrosionsschäden soll nicht rechtzeitig erkannte Schadensursachen auf elektrischem Wege ausschalten. Die vorsorgliche Installation des KKSB dagegen verhindert von Anfang an das Auftreten von Korrosionsschäden, bedeutet aber zusätzliche Herstellungskosten.

Diese zusätzlichen Herstellungskosten sind aber in jedem Falle geringer als die Kosten einer späteren Sanierung. Es entfallen z. B. die Kosten der Schadensanalyse, das Wegnehmen des schadhaften Betons, die Behinderung des Betriebes auf der Gesamtanlage. Es entfallen aber auch die Kosten, die zur Behebung und Kontrolle der Korrosionsströme aus sich bildenden galvanischen Elementen zu erwarten sind, z. B. zwischen sanierten und nicht sanierten Bereichen, zwischen chloridbeaufschlagten und chloridfreien Bereichen.

Dazu kommt, daß — bei späterer Sanierung — am Bauwerk bleibende Schäden in Form von Querschnittsschwächungen und Korrosions-Kerben in Kauf genommen werden müssen.

Bei gleichzeitig vorgesehenem kathodischen Schutz des stählernen Unterbaues (Spundwand, Stahlpfähle), können beide Systeme aus gemeinsamen Anlagen versorgt werden und zweckmäßigerweise vom gleichen zugelassenen Unternehmen geplant und ausgeführt werden. Vorteile bei der Verlegung und Wahl der Anodensysteme können hinzukommen.

Anoden an Untersichten über dem Wasser sind nachträglich mit vertretbarem Aufwand nicht applizierbar.

Die *Indikation* für die Anwendung von KKSB ist gegeben, wenn mit Chloridverseuchung zu rechnen ist,

- z. B. durch Meerwasserbenetzung, bevorzugt der Wetterseite ausgesetzte senkrechte Flächen im Tide- und Spritzwasserbereich
- z. B. durch Stein- und Kalisalzumschlag
- z. B. durch hohe und wiederkehrende Tausalzbelastung auf befahrenen Flächen.



Die Indikation zur Anwendung verstärkt sich bei hohen mittleren Luftfeuchtigkeiten und hohen mittleren Umgebungstemperaturen — eine Erhöhung um 10° C kann eine Zunahme des Korrosionsstromes auf 150 % bis 200 % bewirken.

#### 4.2 **Vorbereiten der Bewehrung, elektrische Installation**

Die für die Wirksamkeit des KKSB entscheidende Voraussetzung, gute und durchgängige Leitfähigkeit des gesamten Bewehrungskorbes, läßt sich bei Neubauten leicht und ohne erhöhten Aufwand verwirklichen. Einschränkungen, wie sie bei Sanierungsarbeiten zwangsweise auftreten, wie Zugängigkeit, Unkenntnis der Bewehrungshäufigkeit, der Betondeckung und ihrer Toleranzen usw. gibt es bei Neubauten nicht.

Die notwendigen Schweißverbindungen im Bewehrungskorb können bereits in die Bewehrungspläne eingearbeitet werden. Die Auswahl der örtlichen Schweißpunkte erfolgt nur entsprechend den technischen Anforderungen. Das gilt auch für die Ortswahl und die Herstellung der Kathodenanschlüsse zur Stromeinleitung und Anschluß der Referenzelektroden, die optimal den Bereichen mit hohem Bewehrungsindex zugeordnet werden können. Selbst die Verlegung der Kathoden-, Anoden- und Meß-Kabel kann in einfachster Weise vorgeplant und auf der Baustelle ausgeführt werden, um ihnen im Beton einen sicheren Halt und mechanischen Schutz zu geben, ohne auf Schutzrohre oder sonstige Hilfsmittel angewiesen zu sein. Bei geeigneten Bauformen können sogar die Referenzelektroden unmittelbar an den Stählen angebracht und angeschlossen werden.

Das gesamte elektrische System des KKSB läßt sich in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Bauingenieur und Korrosionsschutzingenieur an Hand der Bewehrungspläne auf die besonders gefährdeten Bereiche hin optimal auslegen und auf der Baustelle nach Abschluß der Armierungsarbeiten und vor dem Betonieren verwirklichen.

#### 4.3 **Einsatz der Anoden**

Die heute verfügbaren Anodensysteme sind für *Sanierungsmaßnahmen* entwickelt worden und haben sich in diesem Einsatzgebiet bewährt. Ihre Anwendung bei Neubauten zum vorsorglichen Schutz erfordert besondere Maßnahmen, z. T. auch konstruktive Modifizierungen (Steifigkeit, Maschenweite). Bei der Planung eines kathodisch zu schützenden Neubaus kann

die Gefahr eines Kurzschlusses zwischen Bewehrung und Anode bereits durch zweckmäßige konstruktive Gestaltung der Anodensysteme, der Montagesysteme und der Betoneinbaumethode minimiert werden, wobei vor allem der rauhe Baustellenbetrieb in die Betrachtung einzubeziehen ist.

Für Untersichten und Seitenansichten bietet es sich an, die Anode in Form eines Streckmetallgitters aus metalloxidbeschichtetem Titan als Bewehrung einer 4 bis 6 cm dünnen Fertigteilplatte einzubauen. Diese Fertigteilplatte dient als verlorene Schalung, ihr Verbund mit dem Ortbeton ist allein durch die Oberflächenrauigkeit oder mit Kunststoffdübeln herzustellen, damit ein Kontakt zwischen Anode und Bewehrung ausgeschlossen ist. Wo ein Einsatz von Fertigteil-Schalenelementen nicht möglich ist, kann durch Verwendung von Spezialabstandhaltern aus Polyethylen oder Faserbeton, die noch zu entwickeln und zu erproben sind, ein sicherer Zwischenraum zwischen Bewehrung und Anode, sowie zwischen Anode und Schalung eingehalten werden. Die Steifigkeit des Anodengitters und die Abstände der Abstandhalter sind aufeinander abzustimmen. Eventuell muß jeder Bewehrungsknotenpunkt erfaßt werden, bzw. sind Linienabstandhalter einzusetzen.

Vorstellbar ist auch die Entwicklung einer mit Faserbeton umhüllten Draht- oder Stabanode, wobei die Betonhülle als Abstandhalter zwischen Bewehrung und Schalung dient. Diese Anoden könnten bei Längen von 2 bis 10 m durch Schweißung verbunden werden.

An horizontalen Aufsichtflächen (Kaipplatten) ist das im Abschnitt 3 (Sanierung) beschriebene Verfahren der Verlegung von Anodengittern auf einem Isoliermörtel über der obersten Bewehrungslage zweckmäßig. Zur Verbesserung des Verbundes und Vermeidung von Rissen kann das Anodengitter kurz nach dem Ansteifen des Ortbetons direkt auf die sorgfältig mit genügender Überdeckung hergestellte, aufgerauhte Oberfläche aufgelegt und „frisch in frisch“ mit Deckbeton (evtl. Splittbeton oder Estrichmörtel) einbetoniert werden.

Bei allen Einbaumethoden muß auf der Baustelle mit größter Sorgfalt vorgegangen werden. Durch Widerstandsmessungen — auch während des Betonierens (Warnsignale!) — muß sichergestellt werden, daß keine Kurzschlüsse vorhanden sind oder entstehen. Alle zu ihrer Verhinderung gemachten Aufwendungen zahlen sich aus, denn entstandene Kurzschlüsse sind schwer und nur mit aufwendigen elektrischen Flächen-

messungen zu orten und noch schwerer und kostenträchtig zu beseitigen. Einzelne kleine Berührungsstellen können evtl. durch „Wegbrennen“, d. h. kurzfristiges Einleiten von hohen Spannungen (bis zu 120 V) getrennt werden; in anderen Fällen muß aufgestemmt werden.

#### 4.4 Gütesicherung beim Einbringen des Betons

Die Güteeigenschaften des Stahlbetons dürfen durch die Anordnung von Anoden im Bauwerk nicht eingeschränkt werden. Es wird daher zweckmäßig sein, die Betonrezeptur für jeden Anwendungsfall unter Berücksichtigung der Art des Anodensystems und der Methode seines Einbaus neu zu ermitteln. Dabei sind Steifigkeit und Maschenweite des Anodengitters von besonderer Bedeutung und mit dem Anodenhersteller abzustimmen. Der Betonfachingenieur hat die Möglichkeit, durch die Variation von

- max. Korngröße des Zuschlags
- Sieblinie des Zuschlags
- Menge und Art des Zementes
- Rundkorn oder Splittkorn
- Wassergehalt des Betons
- Zusatzmittel

den Frischbeton so einzustellen, daß er problemlos eingebaut und verdichtet werden kann und die geforderten Güteeigenschaften (z. B. Festigkeit, Frostbeständigkeit, Wasserundurchlässigkeit etc.) erreicht.

Vor der Verarbeitung im Bauwerk werden mit der ermittelten Betonrezeptur Versuche an bauwerksähnlichen, bewehrten und mit Anoden ausgerüsteten Probebauteilen gefahren. Diese „Arbeitsproben“ geben Auskunft, ob die gewählte Einbau- und Verdichtungsmethode zu den gewünschten Ergebnissen führt.

Eine einwandfreie Qualität läßt sich bei serienmäßig im Betonwerk herzustellenden Fertigteilplatten als Anodenträger (vergleiche Abschnitt 4.3, 2. Absatz) selbstverständlich leichter verwirklichen als im rauen Baustellenbetrieb. Dort, bei Einbau des Betons im Bereich ungeschützter Anodengitter, ist besondere Sorgfalt und Aufmerksamkeit sowie strenge Einhaltung des im Versuch vorher getesteten Verfahrens notwendig (vergleiche Abschnitt 4.3, letzter Absatz).

#### 4.5 Wirksamkeit des KKS, Schutzkriterien

Der vorbeugende KKS zeigt auch in seinem elektrochemischen Verhalten eine wichtige Besonderheit:

Die Stahloberflächen befinden sich im *passiven* Zustand, evtl. örtliche Durchbrüche werden durch Selbstheilung beseitigt. Es gibt keine aktiven Bereiche, bei *gleichen* Umgebungsbedingungen auch keine Potentialdifferenzen auf der Stahlfläche. Korrosion (Eigenkorrosion) findet nicht statt. Erst durch Einschalten einer Schutzanode entsteht eine Potentialdifferenz. Es fließt bei gegebener Leitfähigkeit ein Schutzstrom (konventionell) zur Stahloberfläche als Kathode, der hier eine Elektronenansammlung und damit eine Potentialabsenkung bewirkt und die kathodische Reaktion, d. h. die Reduktion von Sauerstoff, erzwingt. Dazu sind sehr kleine Schutzstromdichten völlig ausreichend. Diese unterstützen die Selbstheilung eventueller örtlicher Unstabilitäten der passiven Stahlflächen, behindern grundsätzlich aber auch die Gefahr bringende Migration von Chlorionen zur Kathode. Die Passivität des Stahls bleibt somit langfristig erhalten.

Befinden sich *passive* Bewehrungsflächen in *unterschiedlichen* Umgebungsbedingungen — z. B. unterschiedliche Belüftung, Durchfeuchtung, Chloridkonzentration — treten Potentialdifferenzen auf. Es bilden sich Makroelemente mit räumlich getrennten Bereichen mehr oder weniger starken negativen Potentials. Die resultierenden galvanischen Elementströme sind aber außerordentlich klein, da die elektrischen Durchtrittswiderstände passiver Schichten sehr hoch sind. Auch im negativeren Umgebungsbereich (Anode des Makroelementes) tritt daher praktisch keine Korrosion auf, es besteht aber die latente Gefahr des Übergangs in den aktiven Zustand. Der eingeschaltete KKS kompensiert nur diese Elementströme durch Ausgleich der Potentialdifferenz des Elements, also Absenken der weniger negativen Umgebungsbereiche (Kathode des Makroelementes). Er verringert die Gefahr des Übergangs der stärker negativen Umgebungsbereiche in den aktiven Zustand, stabilisiert somit die Passivität.

Erst erhebliche Chloridverseuchungen können nach langer Migrationszeit örtlich die *Passivität aufheben*. Teilbereiche der Stahlbewehrung werden *aktiv*, ihre Potentiale sinken ab. Hier fallen die elektrischen Durchtrittswiderstände der Phasengrenze Bewehrungsstahl/Elektrolyt des Betons außerordentlich stark ab. Die Folge ist eine erhebliche Zunahme des Schutzstromes, der den austretenden Ionenstrom kompensiert. Die Korrosion bleibt verhindert.

Die beschriebene Wirksamkeit des KKSB, seine Fähigkeit, die Stabilität von Passivschichten zu unterstützen und aktiv werdende Flächen sofort und dauerhaft kathodisch zu schützen, muß kontrolliert und nachgewiesen werden können. Da sich auch passive Flächen nicht beliebig leicht kathodisch polarisieren lassen, bietet sich für die Inbetriebnahme das Kriterium 2, Absenkung des am wenigsten negativen Potentials um mindestens 300 mV, an. Wechselnde Umgebungsbedingungen können aber mit kleinen Stromänderungen relativ große Änderungen des Einschaltpotentials bewirken.

Ein wirksamer KKSB wird die Passivität der Bewehrung über lange Zeit erhalten können. Bei schwierigen Umgebungsbedingungen, insbesondere bei starkem Chlorideintrag, muß aber langfristig mit der Aktivierung der Bewehrung gerechnet werden. Die Korrosion bleibt verhindert, aber der dazu erforderliche Schutzstrom nimmt beträchtlich zu. Daraus ergeben sich dann aber auch die gleichen Probleme mit der Anwendung der Schutzkriterien, wie sie im Abschnitt 3.3 für Sanierungsmaßnahmen ausführlich dargestellt wurden. Eine Überwachung des Verhaltens von Schutzstrom und Potential in gewissen Zeitabständen oder gar kontinuierlich ist unerlässlich. Zweckmäßigerweise wird der Errichter der KKSB-Anlage durch einen Wartungsvertrag mit diesen Kontrollaufgaben betraut.

Inbetriebnahme der Anlagen, sonstige Wartungs- und Kontroll-Arbeiten unterscheiden sich nicht von den im Abschnitt 3.10 für Sanierungen beschriebenen Maßnahmen.

#### 4.6 **Kosten und Wirtschaftlichkeit**

Auch der vorbeugende kathodische Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls an Hafengebäuden ist eine Sonderfertigung in Maßarbeit und gestattet daher keine allgemeingültigen Kostenangaben.

Die örtlichen Betriebs- und Umgebungsbedingungen, aber auch die Montagemöglichkeiten, bestimmen wesentlich die Gesamtkosten. Je Quadratmeter geschützter Oberfläche muß mit etwa 100 bis 200 DM gerechnet werden.

Für die Betriebskosten kann auf die im Abschnitt 3.11 gemachten Angaben für Sanierungsmaßnahmen verwiesen werden.



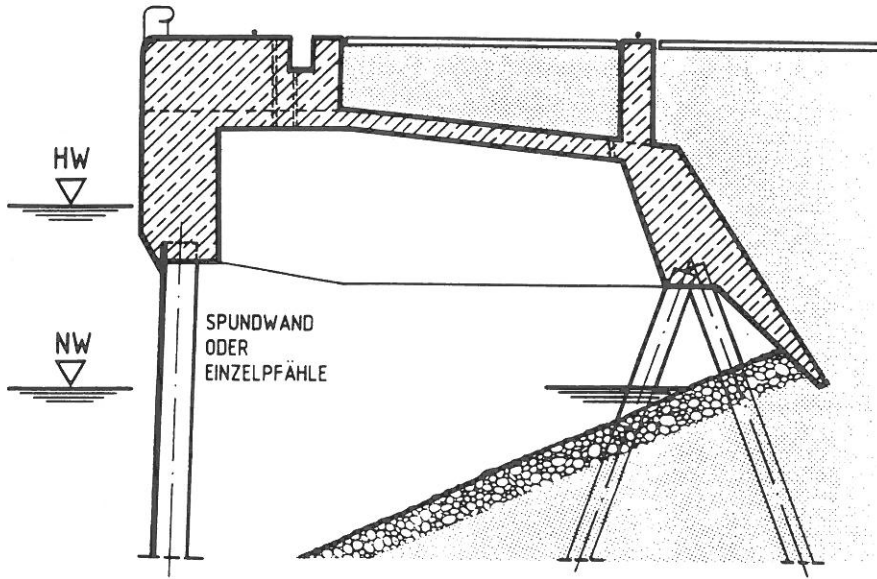


Bild 5.1 Querschnitt einer Kaimauer (Beispiel)

Stromeintrittsgebieten wird Sauerstoff reduziert. Da die Leitfähigkeit im Elektrolyten Meerwasser mindestens 100fach höher ist als im Elektrolyten Betonporenwasser, können diese Ausgleicherscheinungen auch über größere Entfernungen ablaufen.

Der in Beton eingebettete Bewehrungsstahl ist elektrochemisch das edlere Element (Fremdkathode nach DIN 50 297). Der vom Meerwasser benetzte Stahl bildet die „Opferanode“. Spundwandflächen, stählerne Einbauten wie Leitern, Fenderkonstruktionen u. ä., die einseitig in Beton eingebettet und andererseits meerwasserbenetzt sind, bilden solche „Opferanoden“. Besonders gefährdet sind derartige Anoden, die sich an örtlichen Betonabplatzungen herausbilden, wenn der Bewehrungsstahl meerwasserbenetzt wird, die zugehörigen Kathodenbereiche aber gut belüftet bleiben.

Bei Anwendung von elektrisch aktiven Schutzsystemen wie KKS und KKSB sollte diesem „natürlichen“ Potentialgefälle Rechnung getragen werden; d. h. das Potential am Bewehrungsstahl ist positiver (edler) einzustellen, als das Potential der meerwasserbenetzten Stahlteile. Nur so kann die Richtungsumkehr der Ausgleichsströme und damit die Ausbildung von Bereichen mit Über- und Unterschutz verhindert werden.

Die vorstehend beschriebenen Zusammenhänge werden nachfolgend am Beispiel eines Spundwandkopfes aus Stahlbeton im Tidebereich im Detail beschrieben (vergleiche [9]). Dabei werden die Vorteile elektrischer aktiver Schutzsysteme, aber auch ihre Grenzen aufgezeigt. Besondere Beachtung wird dabei der Problemzone im Übergangsbereich Spundwandkopf/Betonüberbau gewidmet, an der häufig charakteristische Korrosionsschäden beobachtet werden (Bild 5.1).

Die unterschiedlichen Auswirkungen und wechselseitigen Beeinflussungen der Korrosionssysteme und der Schutzsysteme hängen von den Spiegelhöhen des Meerwassers in bezug zur Betonunterkante ab.

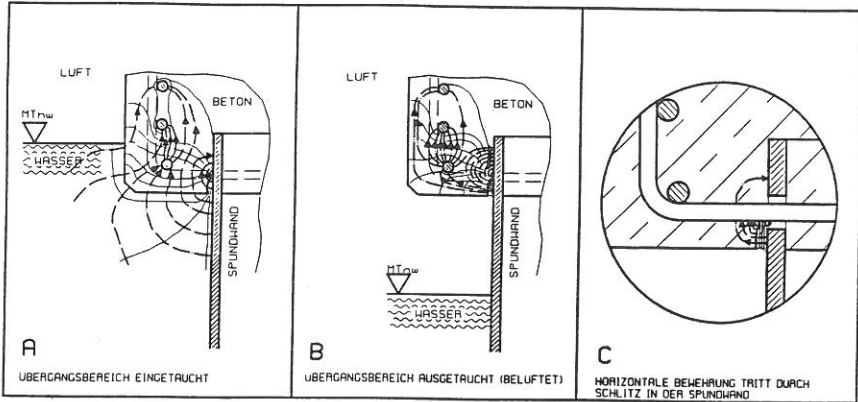
## 5.2 **Problemstellung am Beispiel Übergang Spundwandkopf-Betonholm**

### 5.2.1 **Spundwand und Betonüberbau ungeschützt**

Zu Bild 5.2 A: Übergangsbereich eingetaucht

- a) Die hohe Potentialdifferenz zwischen der anodischen, vom Meerwasser benetzten Spundwandfläche und der kathodischen, von Beton umgebenen Wandfläche, bewirkt im Spaltbereich „Spundwand im Betonholm“ ein Korrosionselement, dessen Intensität jedoch klein bleibt, da die Kathodenfläche schlecht belüftet ist.
- b) Die eingetauchte Bewehrung im zum Teil eingetauchten Betonholm bildet durch unterschiedliche Belüftung und Chlorideintrag Makroelemente. Die Korrosionsintensität ist abhängig von der Betonqualität. Auch im passiven Zustand wird das Potential der eingetauchten Bewehrung um 200 bis 300 mV negativer als das der nicht eingetauchten, besser belüfteten Bewehrung. Deren Ruhepotential stellt sich auf etwa  $-100$  mV ein.
- c) Bereiche a) und b) beeinflussen sich gegenseitig. Die große meerwasserbenetzte Anodenfläche der Spundbohle mit niedrigem Potential (um  $-600$  mV/Cu), niedrigem Ausbreitungswiderstand und niedrigem Elektrolytwiderstand, liefert einen Schutzstrom auf die Bewehrung und verkleinert somit die Intensität des Makroelementes. Dies um so mehr, als die Bewehrungsstähle mit der Spundbohle im allgemeinen leitfähig verbunden sind.





Legende:

Stromaustrittsgebiet		Stromlinie	-Stromeintrittsgebiet	
Anodische Bereiche mit Materialabtrag			Kathodische Bereiche mit Sauerstoffverbrauch	
Spundbohle wasserbenetzt :	-600/-650 mV		Spundbohle betonumhüllt :	-100/-150 mV
A: untere Bewehrung eingetaucht :	-300/-350 mV		Bewehrung über Wasser (belüftet), betonumhüllt :	-100/-150 mV
B: untere Bewehrung belüftet, feucht : Cl - verseucht :	-200/-350 mV bis -650 mV			
C: horizont. Bewehrung wasserbenetzt :	-600/-650 mV			

Alle Potentialangaben sind unbeeinflusste Ruhepotentiale  $U_0$ , gemessen gegen Cu/CuSO<sub>4</sub> - Elektrode.

Bild 5.2 Spundwand und Betonüberbau ungeschützt

Zu Bild 5.2 B: Übergangsbereich ausgetaucht (belüftet)

- Die im Spalt verbliebene Restflüssigkeit läßt das Korrosionselement „Spundwand im Betonholm“ weiterarbeiten, jedoch mit erhöhtem Korrosionsstrom, da die Belüftung im kathodischen Bereich sich erhöht hat. Die Gefährdung der Bohle vergrößert sich, da durch die sehr viel kleinere Anodenfläche die Stromdichte zunimmt (trotz des erheblich vergrößerten Ausbreitungswiderstandes der Anode).
- Im Bereich der unteren, nichteingetauchten Bewehrung arbeitet das Makroelement bei erhöhter Belüftung verstärkt weiter.

- c) Wegen der stark verkleinerten Anodenfläche der Spundbohle wird der der Bewehrung zugute kommende Schutzstrom erheblich kleiner, da der Ausbreitungswiderstand größer geworden ist. Ist das Potential der unteren Bewehrungsstähe zum Beispiel durch Beschädigung des Deckbetons stark abgesunken, wird von diesen Lokalanoden zur Spundwand ein Strom fließen, der die Korrosion der Bewehrung verstärkt, besonders wenn Bewehrung und Spundwand elektrisch leitend verbunden sind.

Ergebnis bei der ungeschützten Spundwand mit Betonüberbau:

Im eingetauchten Zustand werden die Potentialdifferenzen zwischen anodischen und kathodischen Bereichen reduziert. Die ausgedehnte Anode Spundwand schützt die vom Beton umgebene Bewehrung zumindest teilweise. Die Intensität der Korrosionsvorgänge aber bleibt wegen der geringen Belüftung klein.

Anders sieht es dagegen im belüfteten Zustand aus. Es kann sowohl die Spundwand unterhalb der Austrittsstelle aus dem Beton durch Muldenkorrosion als auch die Bewehrung im unteren, zeitweise eingetauchten Bereich durch Lochkorrosion besonders gefährdet sein. Die Korrosion durch Mikroelemente — dicht unterhalb des Betonüberbaues — verstärkt den Korrosionsabtrag an der Spundwand (Eigenkorrosion).

Der Spalt wandert in Kombination von korrosiven und mechanischen Angriffen nach oben und erweitert sich. Diese Schäden können noch verschlimmert werden, wenn horizontal — durch Fenster in der Spundwand — geführte Bewehrungsstähe die Spundwand kreuzen (Bild 5.2 C). Betonabplatzungen im Spalt und am Holm beschleunigen die Korrosionsvorgänge.

### 5.2.2 Spundwand durch KKS geschützt, Betonüberbau ungeschützt

Bei Anwendung des KKS ist die Spundwand im allgemeinen beschichtet. Es wird aber davon ausgegangen, daß die Nachbeschichtung im Einbringungsbereich nach Ramm- und anschließenden Schweißarbeiten, sowie infolge mechanischer Beanspruchung im Spalt, fehlerhaft ist.

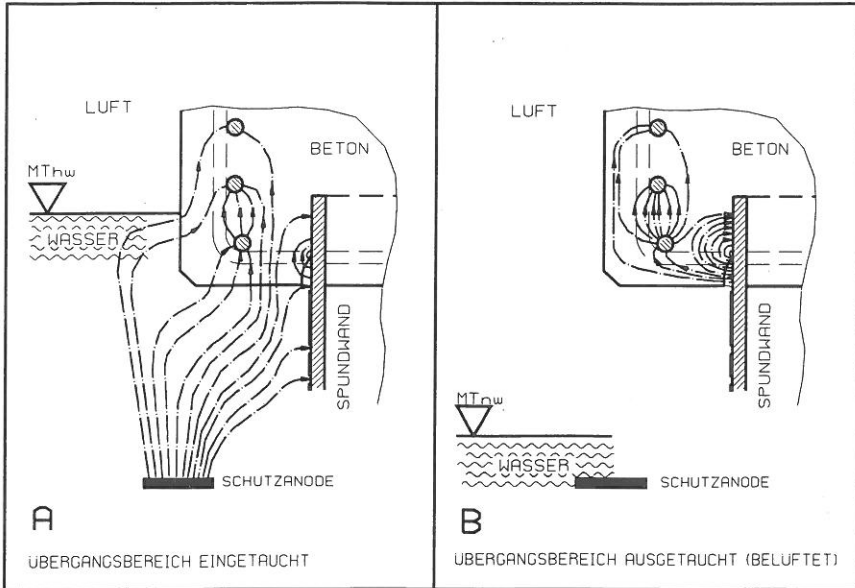


Bild 5.3 Spundwand durch KKS geschützt

Zu Bild 5.3 A: Übergangsbereich eingetaucht

- a) Im eingetauchten Bereich „Spundwand im Betonholm“ wird die Schutzanode des KKS im Spalt – je nach Eintauchdauer – eine Potentialabsenkung bewirken. Die Ionbewegung zum betonumhüllten Spundwandteil bleibt bestehen, jedoch ist wegen geringer Belüftung auch die Intensität gering.
- b) Im eingetauchten Bereich der unteren Bewehrung bilden sich Makroelemente; die Intensität ist herabgesetzt durch den Schutzstrom der KKS-Anode. Die Anteile sind wegen hoher Widerstände im Beton und geringen Widerständen im Meerwasser klein.

Zu Bild 5.3 B: Übergangsbereich ausgetaucht (belüftet)

- a) Im ausgetauchten Bereich „Spundwand im Betonholm“ sind die Verhältnisse mit denen im ausgetauchten Zustand ohne KKS vergleichbar (Abschnitt 5.2.1), mit der Maßgabe, daß sich bei langen Eintauchzeiten, die zu einer Polarisation (Deckschichtbildung) im Schutzstrombereich geführt haben, die Korrosionsgefährdung um die Dauer der Depolarisation verringert.

- b) Desgleichen sind im ausgetauchten Bereich auch die Verhältnisse an der unteren Bewehrung mit denen ohne KKS nach Abschnitt 5.2.1 vergleichbar; der Einfluß der KKS-Anode und der Eintauchzeiten ist geringer als bei der „Spundwand im Betonholm“.

Ergebnis bei der durch KKS geschützten Wand:

Insgesamt kann der Einfluß von KKS Muldenkorrosion im und unter dem Spalt an der Spundwand und Lochkorrosion am Bewehrungsstahl nicht verhindern. Die Korrosionsintensität wird verringert durch längere Eintauchzeiten und leitfähige Verbindung der metallenleitend durchverbundenen Bewehrung mit der Spundwand im kathodischen Bereich.

Haben Absprengungen stattgefunden, die zur Freilegung von Bewehrungsstäben geführt haben, wird im eingetauchten Zustand der Schutzstrom der KKS-Anode auf die freiliegenden Stäbe stark vergrößert; es wiederholt sich aber am freiliegenden Bewehrungsstab in verkleinertem Maßstab der Korrosionsmechanismus der eingetauchten „Spundwand im Betonholm“.

### 5.2.3 Spundwand durch KKS, Bewehrung durch KKSB geschützt

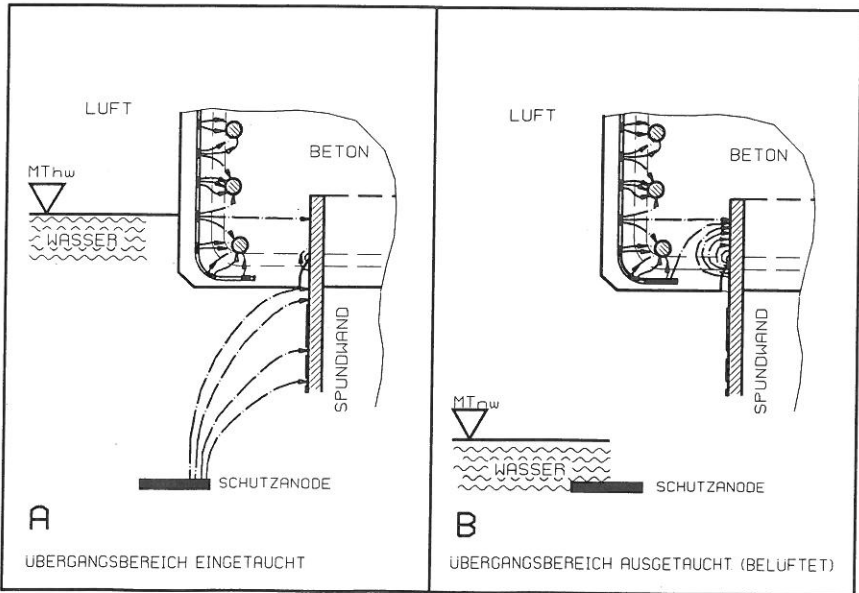


Bild 5.4 Spundwand durch KKS, Bewehrung durch KKSB geschützt

Zu Bild 5.4 A: Übergangsbereich eingetaucht

- a) Im eingetauchten Bereich „Spundwand im Betonholm“ treten kaum Veränderungen ein gegenüber dem Zustand, wenn KKS allein wirksam ist.
- b) Im Bereich der unteren Bewehrung wird die Wirkung des Makroelementes durch KKSB aufgehoben.
- c) Gegenseitige Beeinflussungen von KKS und KKSB bleiben ohne Nachteile, wenn:
  - Bewehrung und Spundwand in kathodischen Bereichen leitfähig miteinander verbunden sind,
  - die untere, eingetauchte Bewehrung ausreichend Schutzstrom erhält, das heißt kathodisch polarisiert wird.

Zu Bild 5.4 B: Übergangsbereich ausgetaucht (belüftet)

- a) Im ausgetauchten Bereich „Spundwand im Betonholm“ sind keine Veränderungen gegenüber dem Zustand, wenn KKS allein wirksam ist, das heißt, das Korrosionselement im Spalt bleibt wirksam.
- b) Im Bereich der unteren Bewehrung wird die Wirkung des Makroelementes durch KKSB aufgehoben.
- c) Die gegenseitigen Beeinflussungen von KKS und KKSB bleiben wie im eingetauchten Zustand ohne Nachteile. Sie werden aber kritisch, wenn in den unteren Bewehrungsstäben durch elektrische Kontakte, beziehungsweise Näherungen Schutzstromverschleppungen des KKSB stattfinden — zum Beispiel im feuchten, belüfteten Spalt an der mangelhaft passiv geschützten Spundwand —, die eine ausreichende kathodische Polarisation verhindern.

Ergebnis bei der durch KKS geschützten Spundwand und der durch KKSB geschützten Bewehrung:

Muldenförmige Korrosion der Spundwand im Übergangsbereich einer ein- und austauchenden Spundwand kann weder durch KKS noch durch KKSB vollständig unterdrückt werden. Diese Spundwandkorrosion und Spaltvergrößerung kann nur durch entsprechende konstruktive Ausbildung und durch Sonderbeschichtungen verhindert werden. KKSB kann bei entsprechender, korrosionsschutzgerechter Gestaltung dem Rosten der Bewehrung begegnen (vergleiche Abschnitt 5.3).

## 5.3 Maßnahmen und Vorsorge gegen Schäden

### 5.3.1 Neubauten

Als allgemein anerkannte Vorsorgemaßnahme beim Betonüberbau am Wasser gilt die metallleitende Durchverbindung der Bewehrung mit leitenden Brücken zum stählernen Unterbau. Sie wird in der Regel zur Ableitung von Reibungselektrizität und von Blitzschlägen sogar vorgeschrieben. Bei der korrosionsgefährdeten Spundwand im Übergangsbereich kann sie sich nachteilig auswirken:

Steht ein dem Meerwasser zeitweise ausgesetzter Spundwandkopf mit der Bewehrung in leitender Verbindung, erzeugen die an der Spundwand austretenden Korrosionsströme — infolge der großen kathodischen Fläche der Bewehrung — Abtrag an der Spundwand, der besonders alleinstehende stählerne Gründungspfähle des Unterbaus gefährden kann.

Durch den Spundwandkopf gehende, beziehungsweise dicht an den Außenkonturen der Spundwand vorbeigeführte Bewehrungsstähle der unteren Bewehrung des Betonüberbaues, sollten möglichst vermieden werden. Ein Abstand entsprechend der Betondeckung oder größer, sollte eingehalten werden. An der Oberkante der Spundwand fest angeschweißte Verankerungsstähle (Abdeckung von Auflagerreaktionen) schaden nicht; sie liegen im kathodischen Bereich.

Es ist zweckmäßig, im Bereich der Einbindung in den Beton, nach dem Rammen und nach Beendigung aller Schweißarbeiten an der Spundwand eine zusätzliche Beschichtung des eingespannten Spundwandkopfes vorzunehmen. Diese Dickbeschichtung, zum Beispiel auf der Basis von Polyurethanen, soll eine Isolierung der Korrosionssysteme im Wasser und im Beton bewirken.

Als konstruktive Verbesserungen kommen in Frage:

- a) Trennen des Betonüberbaus von der Spundwand durch eine gelenkige Auflagerung oberhalb des normalen Hochwasserbereiches (Bild 5.5).
- b) Herstellen einer Lagerbank auf dem Spundwandkopf im Mittelwasserbereich zum Beispiel aus vorgefertigten Betonkomponenten (Bild 5.6).

Werden die Betonkomponenten durch nachträglichen Betonverguß mit dem Unterbau verbunden, ist es zweckmäßig, die Unterkante dieses Querschnittes unter der Niedrigwasserlinie anzuordnen, so daß der Übergangsbereich eingetaucht bleibt.

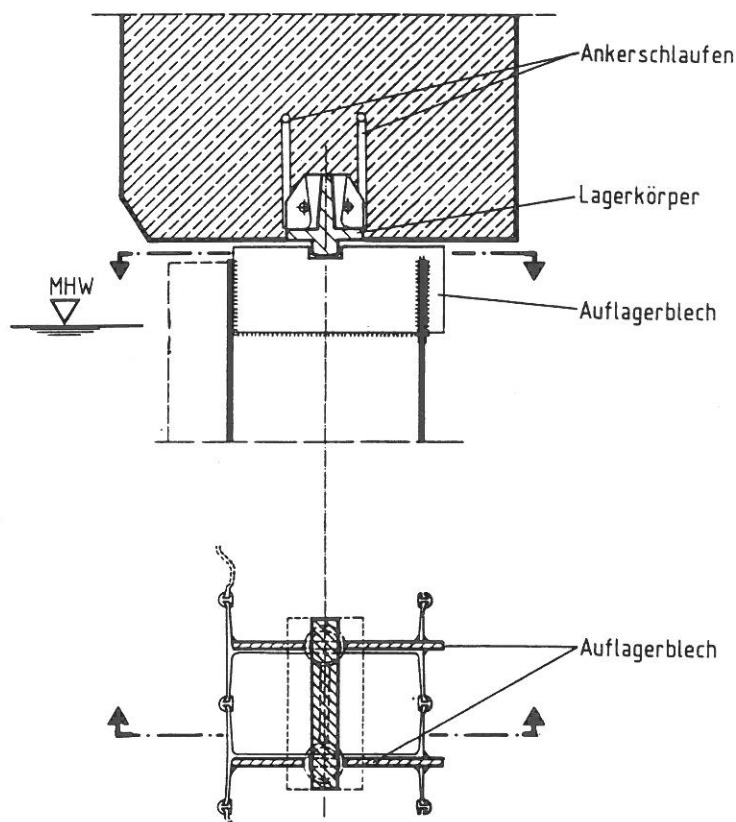


Bild 5.5 Gelenkige Auflagerung des Betonüberbaues oberhalb MHW

Werden Überbau und Unterbau durch kathodischen Korrosionsschutz geschützt, sind beide Systeme — KKS und KKSb — in der Steuerung und Überwachung, soweit möglich, voneinander zu trennen. Korrosionsströme im Spalt werden auch in diesem Fall nur durch eine Dickbeschichtung, das heißt Passivierung des Spundwandkopfes, verhindert werden können, sofern der Übergangsbereich periodisch aus dem Wasser kommt.

Bei einem Neubau können dabei unter anderem folgende konstruktive Vorkehrungen getroffen werden:

- keine Durchverbindung von Bewehrungsstäben in Längs- und Querrichtung durch den Stahlunterbau in der Nähe der Phasengrenze beider Elektrolyte, also dort, wo das Stahlteil

aus dem Beton austritt (der Abstand der Längseisen von der Spundwand entsprechend der Betondeckung oder größer!).

- keine Durchdringung der austretenden Stahlteile mit Anodengittern des KKS, und als Folge davon
- Anordnung der Anodengitter (zum Beispiel metalloxydbeschichtetes Titanstreckmetall) in einer oder mehreren Lagen parallel zur Achse des Stahlunterbaues.

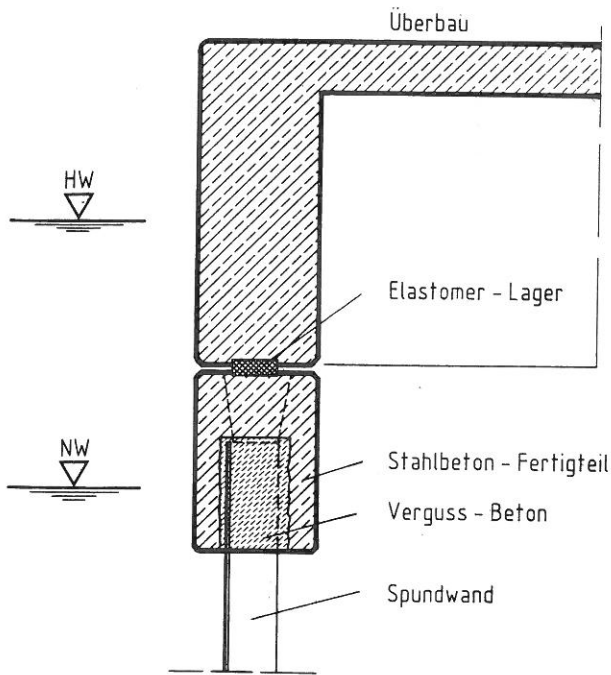


Bild 5.6 Zweiteiliger Betonüberbau mit Gelenk im MW-Bereich

### 5.3.2 Instandsetzungen

Bei der Instandsetzung eines schadhafte Betonüberbaues werden, je nach Höhenlage der Unterkante der zur Reparatur vorgesehenen Betonkonstruktion über dem Meeresspiegel und dem durch KKS geschützten, stählernen Unterbau, zwei Fälle zu unterscheiden sein:

Fall 1: Übergangsbereich überwiegend eingetaucht: gute Voraussetzung für die Sanierung mit KKS und KKS.



Wie zu Bild 5.3 A erläutert, ist die Korrosion der Bewehrung im überwiegend eingetauchtem Betonquerschnitt so gering, daß ein KKSB erst über Wasser voll wirksam werden muß. Im Unterwasserbereich wird ein KKS an Stahlteilen jedoch nicht eingeschränkt (Bild 5.4 A). Beide Systeme müssen elektrisch getrennt voneinander betrieben werden können.

Fall 2: Übergangsbereich überwiegend ausgetaucht: ungünstige Voraussetzungen für die Sanierung mit KKS und KKSB.

Die Möglichkeit einer Sanierung in den Einbindungsbereichen wird davon abhängen, ob die Schadensstellen am Stahlunterbau wirksam passiv geschützt werden können und der Beton instandgesetzt werden kann. Die Voraussetzungen sind wesentlich ungünstiger (Bild 5.4 B).

In solchen Fällen empfiehlt es sich, je nach Lage und Umfang der Korrosionsschäden am Beton, beziehungsweise an den austretenden Stahlteilen, in Relation zu klimatischen Einflüssen (Wind, Wellen, Himmelsrichtung) die optimalen Korrosionsschutzsysteme in Versuchsstrecken über einen Jahreszyklus herauszufinden.

Dabei kann in Zukunft den leitfähigen, anodisch polarisierbaren Deckbeschichtungen und Deckmörteln, die auf einen noch erhaltungswürdigen Betonüberbau appliziert werden, erhöhte Bedeutung zukommen.

## 6 Schrifttum

- [1] Fachausschuß für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft e.V.: Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau. 2. Aufl. Hamburg: 1989
- [2] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. Zement-Kalk-Gips 1969, H. 10, S. 447—456.
- [3] Hausmann, D. A.: Steel corrosion in concrete — How does it occur? Mater. Protection 1967, H. 11, S. 19—23.
- [4] Gouda, V. K., und Halaka, W. Y.: Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel. British Corrosion 1970, S. 198—204.
- [5] Rechenberger, P.: Elektrochemische Modellversuche zur Frage der chloridinduzierten Baustahlkorrosion. Zement-Kalk-Gips 1983, H. 10, S. 582—590.
- [6] Binder, G.: Über den Chlorideinbau und dessen Nachweis in tausalzbeaufschlagten Betonen. Zement-Kalk-Gips 1993, H. 12, S. 784—791.
- [7] Crane, A. P.: Corrosion of reinforcement in concrete construction. 437 P., Ellis Herwood Lim., Chichester 1983.
- [8] Leppard, N. W., und Wyatt, B. S., e. a.: Repair and cathodic protection of reinforced concrete substructures to four wharves at Mina Zayed, Abu Dhabi. UK-Corrosion 1991.
- [9] Heiß, P., Möhlmann, F. und Röder, H.: Korrosionsprobleme im Hafentechnik am Übergang Spundwandkopf zum Betonholm. Hansa 1992, H. 9, S. 1039—1045.

### Weiterführende Literatur:

Jungwirth, D., Grübl, P., und Windisch, A.: Elektrochemische Schutzverfahren für bewehrte Bauteile aus baupraktischer Sicht. Beton und Stahlbeton 1991, S. 167—181 und S. 190—192.

Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 433. Berlin: Beuth Verlag 1992.

Cathodic Protection of Reinforced Concrete. Concrete Society. Technical Report No. 36.

Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz: Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken. Zürich: 1991.

Elsener, E.: Potentialfeldmessungen — Zerstörungsfreie Lokalisierung der Korrosion in Stahlbetonbauwerken. 1. Intercorr, 18. bis 20. März 1991. Berlin. S. 201—226.