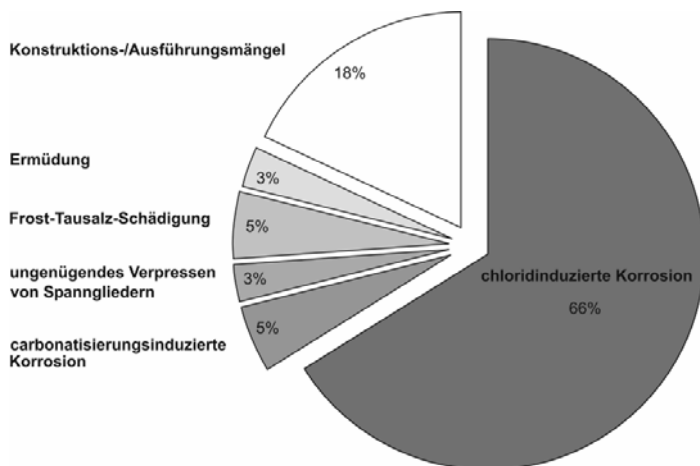


# Chloridbelasteter Beton – immer ein Entsorgungsfall?

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt  
Hochschule München  
Fakultät Bauingenieurwesen / Lehrgebiet Baustoffe  
dauberschmidt@bau.hm.edu

## 1. Einleitung

Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte hat leidvoll gezeigt, dass unsere Stahlbetonbauwerke nicht für die Ewigkeit gebaut sind, sondern dass sie Alterungs- und Schädigungsprozessen unterworfen sind. Dabei spielen Chloride aus Tausalzen oder Meerwasser eine besondere Rolle, wie *Bild 1* eindrücklich zeigt. Allein an Verkehrsbauten verursachen Schäden durch das Eindringen von Wasser und von Chloriden in die Stahlbeton-Konstruktionen jährliche Kosten in Milliardenhöhe.



*Bild 1: Schäden an Brücken unterschieden nach Schädigungsart*

Die Instandsetzung solcher chloridbelasteter Bauwerke erfolgt in den meisten Fällen nach den Vorgaben der „Richtlinie Schutz und Instandsetzung“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Rili-SIB) [1] durch Entfernen des chloridbelasteten Betons und der anschließenden Reprofilierung. Für diese Instandsetzungsvariante liegen zwar die meisten Erfahrungen vor und sie kann eindeutig den „Anerkannten Regeln der Technik“ zugeordnet werden, aber dennoch ist sie mit zahlreichen Nachteilen, wie hohe Kosten, Lärm- und Staubbelastungen, Sperrzeiten und Eingriffe in die Tragstruktur verbunden.

Die Instandsetzungsrichtlinie erlaubt aber auch innovative Konzepte, bei denen auf ein Entfernen des chloridbelasteten Betons verzichtet werden kann. Diese Konzepte werden nachfolgend kurz vorgestellt und hinsichtlich Kosten und Risiken bewertet. Dabei zeigt sich: „Chloridbelasteter Beton ist nicht immer ein Entsorgungsfall“!

## 2. Problematik der chloridinduzierten Korrosion von Stahl im Beton

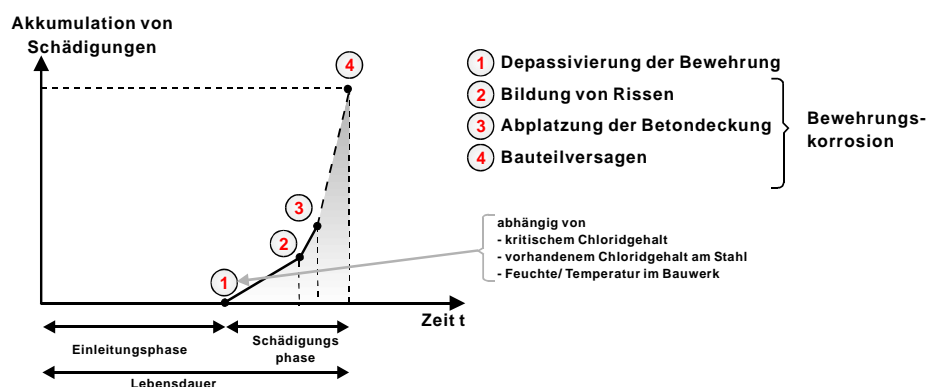
## 2.1. Einleitungsphase

Neben dem abgestimmten Einsatz der jeweiligen Tragfähigkeiten von Stahl und Beton ist ein weiterer Grund für den seit rund 150 Jahren währenden Erfolg des Konstruktionswerkstoffes Stahlbeton der vom Beton bereitgestellte Korrosionsschutz des Stahls. Durch den hohen pH-Wert der Betonporenlösung von über pH 13 bildet sich auf der Stahloberfläche ein nur wenige Atomlagen dicker Passivfilm, der den darunter liegenden Stahl vor weiterer Auflösung schützt.

Die Passivität des Bewehrungsstahls kann verloren gehen, wenn der ihn umgebende Beton seine Alkalität verliert oder wenn ein kritischer Chloridgehalt an der Stahloberfläche überschritten wird. Der erstgenannte Vorgang ist unter Praxisbedingungen die Karbonatisierung des Betons. Hierbei diffundiert üblicherweise  $\text{CO}_2$  aus der Umgebungsluft in den Beton ein und durch Bildung von  $\text{CaCO}_3$  bei Verbrauch von  $\text{Ca(OH)}_2$  führt dies zu einer Absenkung des pH-Werts des Betons, wodurch sich der Passivfilm auflöst und der Stahl dadurch korrosionsbereit vorliegt. Die Depassivierung durch Karbonatisierung des Betons und anschließende aktive Korrosion des Stahls mit einhergehenden Schädigungen der Tragstruktur kann in unseren gemäßigten Breiten durch Wahl eines geeigneten Betons (mit hoher Alkalitätsreserve) und einer ausreichenden Betondeckung zielsicher verhindert werden.

Die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit bei Chloridexposition stellt zumeist ein ungleich größeres Problem dar. Chloridionen diffundieren in den Beton (oder werden von kapillar eingesogenem Wasser mittransportiert) und treten, wenn sie die Stahloberfläche erreichen, in Interaktion mit dem Passivfilm des Stahls. Wird eine kritische Konzentration an freien Chloridionen am Stahl überschritten, versagt der Passivfilm des Stahls und Korrosion kann einsetzen. Diese Phase des Chlorideindringens vor Depassivierung des Stahls wird Einleitungsphase genannt. Mit Einsetzen der Korrosion beginnt die Schädigungsphase.

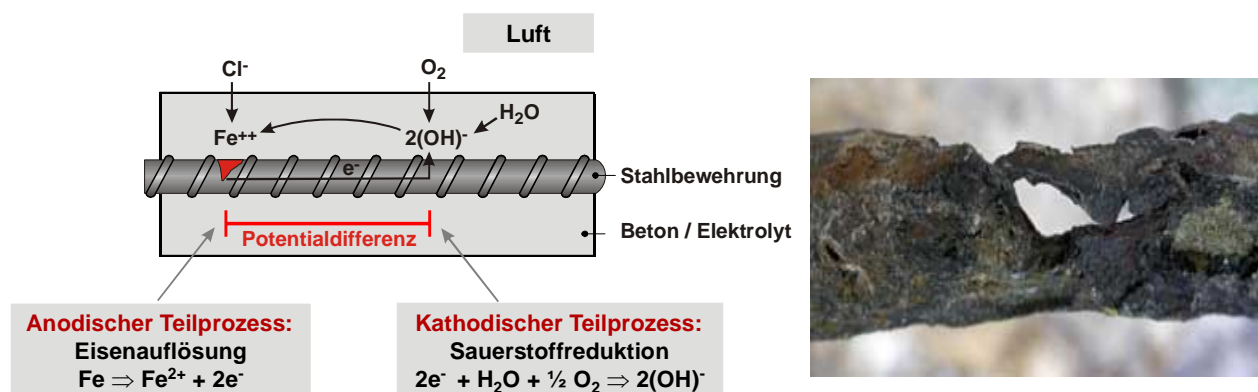
Den zeitlichen Ablauf der akkumulierten Schädigungen an Stahlbetonbauwerken in chloridhaltiger Exposition zeigt *Bild 2*. Daraus ist ersichtlich, dass eine Schädigung des Stahlbeton durch Chloride erst nach Beginn der Korrosion stattfindet.



*Bild 2: Zeitlicher Ablauf der akkumulierten Schädigungen an Bauwerken mit chloridinduzierter Korrosion [2]*

## 2.2. Depassivierung von Stahl im Beton

Bei der Korrosion (z.B. der Lochfraßkorrosion) von Stahl in Beton gehen positiv geladene Eisenionen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) in Lösung, wobei Beton den Elektrolyten darstellt. Die überschüssigen Elektronen ( $e^-$ ) werden an der Grenzfläche Stahl/Elektrolyt von Wasser und Sauerstoff, der üblicherweise in ausreichender Menge im Wasser gelöst ist, unter Bildung von negativ geladenen Hydroxydionen ( $\text{OH}^-$ ) aufgenommen, so dass sowohl im Eisen als auch im Elektrolyten das Ladungsgleichgewicht erhalten bleibt. Die Eisenauflösung (Bildung von  $\text{Fe}^{2+}$ ) wird als anodischer Teilprozess, die Bildung von Hydroxydionen ( $\text{OH}^-$ ) als kathodischer Teilprozess bezeichnet, *Bild 3*. Vereinfacht betrachtet, entspricht die Korrosion in einem Korrosionselement den Vorgängen in einer Batterie mit einem elektrischen und einem elektrolytischen Teil eines Stromkreislaufes



*Bild 3:* Schematische Darstellung der Korrosion von Betonstahl, links und durch chloridinduzierte Korrosion geschädigter Stahl, rechts [13]

## 2.3. „Der“ kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt

Der Gehalt an Chloridionen, bei dem Korrosion des Stahls im Beton einsetzt, wird „kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt“ genannt. Dessen Höhe ist maßgebend für die Dauer der Einleitungsphase und bestimmt den Zeitpunkt der Korrosionsinitiierung. Dieser Gehalt ist allerdings kein fester Grenzwert, er hängt von vielen Parametern ab, die z.T. noch gar nicht untersucht wurde. Die Rili-SIB gibt als Grenzwert, ab dem ein sachkundiger Planer eingeschaltet werden soll, 0,50 M.-% bezogen auf den Zementgehalt an. In der Praxis werden aber auch häufig Werte von weit über 1,0 M.-%/z. ermittelt, ohne dass die Bewehrung depassiviert ist.

Untersuchungen zeigen, dass z.B. die Porigkeit in der Kontaktzone Bewehrung/Beton den kritischen Chloridgehalt stark beeinflusst, siehe *Bild 4*. Weitere wichtige Einflussparameter sind die Herstellbedingungen des Bewehrungsstahls, die chemische Zusammensetzung des Betons und die einwirkende Exposition auf das Bauwerk. So erhöht sich der kritische Chloridgehalt, bei dem es zu einer Schädigung des Bauwerks kommt, nach *Bild 5* bei sehr hohen Wassergehalten (Sauerstoffarmut im Beton) genauso wie bei sehr trockenen Betonen, bei denen der hohe Betonwiderstand den Korrosionsprozess zum Erliegen bringen kann.

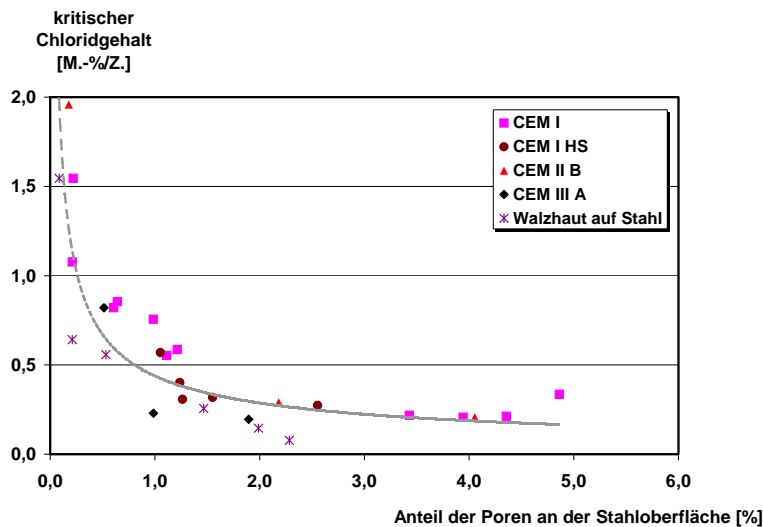


Bild 4: Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Verdichtungsporen in der Kontaktzone Stahl/Beton und dem kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt [3]

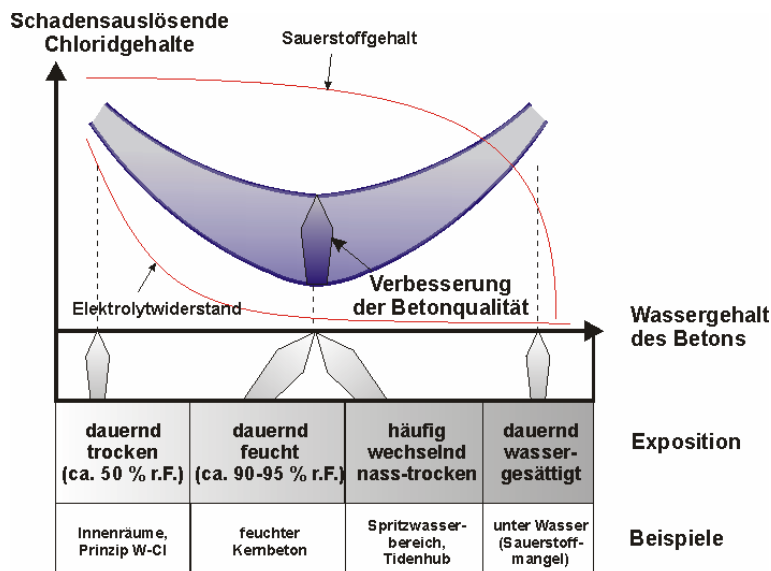


Bild 5: Schematischer Zusammenhang zwischen Chloridgehalten, die zu Schäden führen und der Exposition des Bauwerks [4]

Dies zeigt, dass man von „dem“ kritischen Chloridgehalt nicht ausgehen kann, sondern dass dieser für jedes Bauwerk mit seinen ganz spezifischen Randbedingungen bestimmt werden muss. Eine Korrosionsinitiierung von Stahl in Beton (normaler Porigkeit) bei Chloridgehalten < 0,25 M.-%/z. ist auch bei ungünstigen Randbedingungen nicht zu erwarten, wie auch in [5] anhand von umfangreichen Laboruntersuchungen gezeigt werden konnte.

#### 2.4. Die Gefährlichkeit der Lochfraßkorrosion

Chloridinduzierte Lochfraßkorrosion von Stahl im Beton führt unter normalen Umständen (z.B. Vorhandensein von Wasser im Beton) zu hohen Korrosionsraten, da bei einer kleinen Korrosionsnarbe eine große Kathodenfläche den Korrosionsprozess „antreibt“. Die mit diesen hohen Korrosionsraten verbundenen Stahlabtragsraten können den Stahlquerschnitt der Bewehrung innerhalb kurzer Zeit deutlich reduzieren, siehe Bild 3, rechts. Die zusätzliche Gefährlichkeit der chloridinduzierten Loch-

fraßkorrosion besteht darin, dass diese häufig von außen nicht zu erkennen ist, so kann der Bewehrungsstahl „durchgerostet“ sein, ohne dass an der Betonoberfläche ein Anzeichen von Schädigungen erkennbar ist. Dies erschwert häufig auch die Vermittlung einer kostenintensiven Instandsetzung gegenüber dem Bauherren, da von außen betrachtet sein Bauwerk noch schadensfrei ist.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass, wenn Risse die Bewehrung kreuzen, v.a. wenn es sich dabei um Trennrisse handelt, die Korrosionsinitiierung durch Chloride ohne Einleitungsphase nach *Bild 2* sehr zügig stattfinden kann und üblicherweise zu deutlich erhöhten Korrosionsraten führt. Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Ausführungen jeweils kurz auf die Problematik der chloridbelasteten Risse eingegangen.

### 3. Instandsetzungsprinzipien nach Rili-SIB

Die in *Bild 3* gezeigten Korrosionsprozesse können im Rahmen eines Korrosionsschutzes wie folgt unterbunden werden:

- Vermeiden der anodischen Teilreaktion  
Dieses Ziel kann auf verschiedene Weise erreicht werden. Eine erste Möglichkeit besteht darin, das alkalische Milieu in Umgebung der Bewehrung wiederherzustellen (bzw. die vorhandenen korrosionsauslösenden Chloride zu entfernen). Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass man die Bewehrung in einem geschlossenen Regelkreis zwingt, kathodisch zu wirken (Kathodischer Korrosionsschutz, KKS). Eine dritte Möglichkeit besteht schließlich darin, den Elektrolyten durch eine wirksame Beschichtung vom Stahl zu trennen und somit den anodischen Teilprozess zu unterbinden.
- Vermeiden der kathodischen Teilreaktion  
In ausreichend feuchtem Beton kann die kathodische Reaktion bei unbeschichteter Bewehrung nur dann unterbunden werden, wenn kein Sauerstoff zur Oberfläche der Bewehrung gelangen kann. Unter baupraktischen Verhältnissen ist das Unterbinden des kathodischen Teilprozesses jedoch nur in seltenen Sonderfällen realisierbar. Die Richtlinie des DAfStb sieht diese Möglichkeit als Instandsetzungsprinzip deshalb nicht vor.
- Unterbinden des elektrolytischen Teilprozesses  
Durch Absenkung des Wassergehaltes im Beton kann die Korrosionsgeschwindigkeit auf praktisch vernachlässigbare Werte gesenkt werden, da sämtliche Transportvorgänge im Beton gehemmt werden.

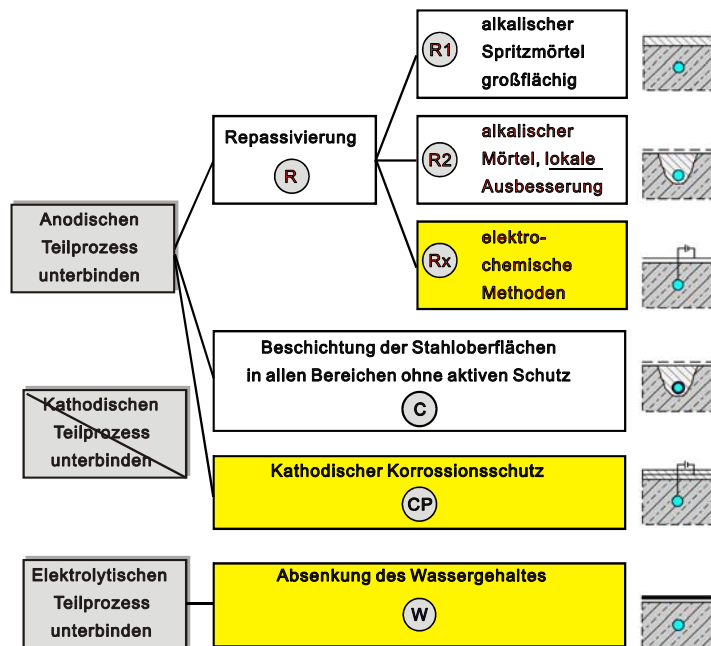


Bild 6: Korrosionsschutzprinzipien nach Rili-SIB mit Kennzeichnung der Prinzipien, bei denen der chloridbelastete Beton nicht entfernt werden muss

Aus diesen technischen Möglichkeiten, den Korrosionsprozess zu unterbinden, ergeben sich die grundsätzlichen Korrosionsschutzprinzipien nach der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [1]:

- R Wiederherstellen des aktiven Korrosionsschutzes durch Repassivierung der Bewehrung bzw. der dauerhafte passivierende Wirkung des Betons.
- W Absenken des Wassergehaltes auf Werte, die sicherstellen, dass der elektrolytische Teilprozess soweit unterbunden wird, dass die weitere Korrosionsgeschwindigkeit auf ein unschädliches Maß reduziert ist.
- C Beschichtung der Stahloberflächen, um den anodischen (und kathodischen) Teilprozess im Bereich der Instand gesetzten Stahloberflächen zu unterbinden.
- K Kathodischer Korrosionsschutz, um die Bewehrung in einem geschlossenen Regelkreis zu zwingen ausschließlich kathodisch zu wirken.

Das Korrosionsschutzprinzip R sieht als konventionelle Instandsetzungsvariante das Entfernen des chloridbelasteten Betons (Chloridbelastung über den kritischen Chloridwerten) und das anschließende Reprofilieren vor. Auch bei Prinzip C, dem Beschichten der Bewehrung, welches unter Baustellenanwendung mit erheblichen technischen Risiken verbunden ist, muss die Betonüberdeckung entfernt und anschließend wieder reprofiliert werden.

Somit verbleiben nach der Rili-SIB drei Instandsetzungsprinzipien, bei denen der chloridbelastete Beton nicht entfernt werden muss: Prinzip Rx, bei dem durch elektrochemische Verfahren die Chloride aus dem Beton extrahiert werden, Prinzip W-Cl und Prinzip K, siehe Bild 6. Diese Prinzipien werden nachfolgend vorgestellt.

## 4. Instandsetzungsprinzip W-Cl

### 4.1. Beschreibung des Instandsetzungsprinzips W-Cl

Bei dem Instandsetzungsprinzip W wird üblicherweise die Betonoberfläche mit dem Ziel beschichtet, den Wassergehalt des Betons so weit zu reduzieren, dass der dadurch steigende Elektrolytwiderstand des Betons den Korrosionsprozess auf ein unschädliches Maß „abbremst“. Die Austrocknung eines Betons durch eine Beschichtung ist ein sehr langsamer Prozess, wie [6] gezeigt hat. Dies bedeutet, bis der „kritische“ Wassergehalt (unterhalb dessen die Korrosion zum Erliegen kommt) erreicht wird, werden die Korrosionsprozesse weiter ablaufen. Gesicherte Grenzwerte eines kritischen Wassergehaltes im Beton können nach Rili-SIB derzeit nicht angegeben werden.

Das Instandsetzungsprinzip W kann nicht funktionieren, wenn Wasser auf anderen Wegen wie durch die beschichtete Betonoberfläche in das Bauteil gelangt. So kann das Prinzip W nicht bei z.B. WU-Bodenplatten im Grundwasser, Bauteilen, in denen aufgrund mangelnden Wärmeschutzes Kondenswasserbildung stattfindet oder erdberührten Bauteilen (ohne Abdichtung an der Erdseite) funktionieren.

Während das Prinzip W bei karbonatisierungsinduzierter Korrosion ohne Bedenken anzuwenden ist, ist dieses Prinzip bei chloridinduzierter Korrosion (W-Cl) mit einem hohen technischen Risiko aus folgenden Gründen verbunden: Chloride im Beton erhöhen die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons und wirken gleichzeitig hygroskopisch (Feuchtigkeit wird aus der Umgebung aufgenommen und gespeichert). Dies bedeutet, dass die Austrocknung (wenn überhaupt) viel langsamer vonstatten geht und dass dabei der Elektrolytwiderstand dann nicht so stark wie beim chloridfreien Beton abgesenkt wird.

### 4.2. Risiken des Instandsetzungsprinzips W-Cl

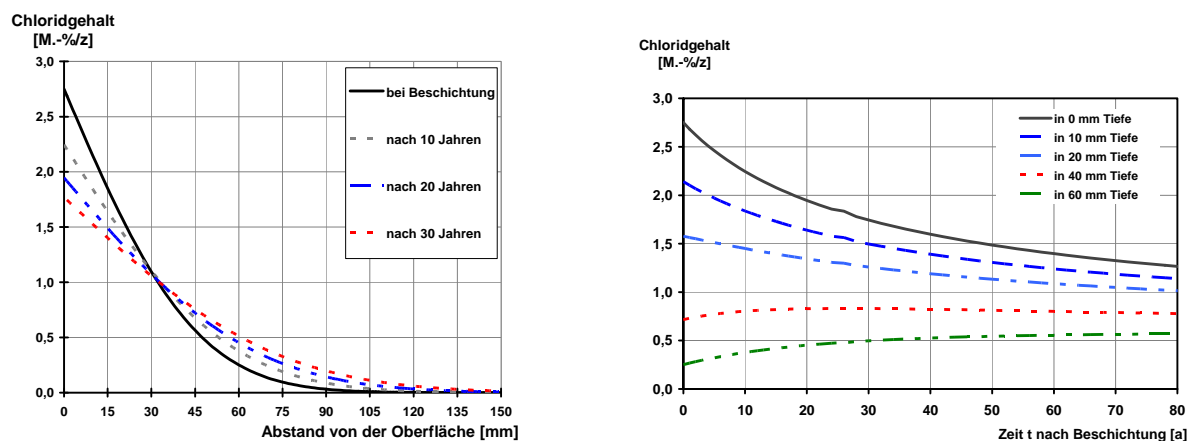
Aus den oben gemachten Ausführungen folgt zwangsläufig, dass das Instandsetzungsprinzip W-Cl mit einem hohen technischen Risiko verbunden ist: dass nämlich der Korrosionsprozess auch nach Beschichtung der Betonoberfläche über einen so langen Zeitraum annähernd ungebremst weiterläuft (oder gar nicht unterbunden wird), dass weitere Schäden entstehen. Diese mögliche Unwirksamkeit des Prinzips W-Cl wurde in zahlreichen Forschungsvorhaben [7], [8] nachgewiesen, aber auch die Praxis zeigt, dass es an beschichteten Bauteilen mit verbleibendem sehr hohen Chloridgehalt nach wenigen Jahren zu weiteren Schäden kommen kann.

Nun schuldet der sachkundige Planer einer Instandsetzungsmaßnahme dem Bauherrn einen Werkerfolg, wobei die aktuelle Gesetzesprechung nicht den Weg, wie dieser geschuldete Werkerfolg erreicht werden kann, vorgibt. Allerdings besteht für den Planer das Gebot, risikoarm und sicher auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme zu planen. Eine solche risikoarme Planung wird erreicht, wenn im Rahmen der anerkannten Regeln der Technik geplant wird. Erfolgt eine Planung außerhalb der anerkannten Regeln der Technik, besteht gegenüber dem Bauherrn ein Aufklärungsbedarf über mögliche Risiken. Nach [9] handelt es sich bei dem Instandsetzungsprinzip W-Cl

nicht um eine anerkannte Regel der Technik. Insofern muss der Bauherr über das mögliche Risiko aufgeklärt werden, dass bei Anwendung dieses Instandsetzungsprinzips die Instandsetzung nicht wirksam ist (Risikoübernahme durch den Besteller).

Ein weiteres technisches Risiko besteht bei Anwendung von W-Cl, welches in *Bild 7* erläutert ist: ein Chloridprofil infolge Diffusion ist gekennzeichnet durch eine hohe Oberflächenkonzentration mit nach innen rasch abnehmenden Chloridwerten. Wird dieses Bauteil beschichtet, werden keine neuen Chloride zugeführt, die vorhandenen Chloride werden sich aber infolge Diffusion umverteilen, und sich damit die Konzentrationen vergleichmäßigen. Dadurch sinken über die Zeit die Chloridwerte an der Betonoberfläche, allerdings können sie im Bauteilinneren ansteigen, wie *Bild 7*, rechts zeigt. So kann auch nach Aufbringen einer Beschichtung nach einigen Jahren der kritische Chloridgehalt überschritten werden und Korrosion initiiert werden.

Aus diesem Grund sollte die Umverteilung der Chloride bei Aufbringen einer Beschichtung auch dann berücksichtigt werden, wenn zum Beschichtungszeitpunkt der kritische Chloridgehalt an der Bewehrung noch nicht erreicht ist.



*Bild 7: Umverteilung der Chloride nach Aufbringen einer Beschichtung*

Für den chloridbelasteten Rissbereich kann aufgrund der geometrischen und feuchtespezifischen Randbedingungen das Prinzip W-Cl kaum empfohlen werden.

#### 4.3. Vorgaben zur Anwendung von W-Cl

Da die Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl mit einem hohen technischen Risiko verbunden ist, schreibt die Instandsetzungsrichtlinie auch einige schwerwiegende Vorgaben für dessen Anwendung vor:

„Die Wirksamkeit von Oberflächenschutzmaßnahmen zur Absenkung und Vergleichmäßigung des Wassergehaltes muss deshalb größer sein als bei Korrosion durch Karbonatisierung“. Dieser Nachweis ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur schwer zu erbringen!



„Das Verfahren sollte nur angewandt werden, wenn durch Probeinstandsetzungen an Referenzflächen bzw. -bauteilen vor Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme die Auswirkung der Maßnahme auf den Korrosionsfortschritt der Bewehrung, z. B. durch Einbau geeigneter Korrosionsstrommessvorrichtungen, von einem sachkundigen Planer überprüft worden ist.“ Dies bedeutet, dass **vor** Durchführung der Instandsetzungsmaßnahme eine Probefläche angelegt und nach einem längeren Zeitraum (üblicherweise über 2 Jahre) der erforderliche Erfolg nachgewiesen werden muss.

Verstößt der Planer gegen diese Vorgaben und informiert er den Bauherren nicht über die möglichen Risiken, begibt er sich außerhalb der „Anerkannten Regeln der Technik“ und setzt sich einem sehr hohen Haftungsrisiko aus.

#### 4.4. Anwendungsgebiete von W-Cl

Die o.g. Vorgaben der Instandsetzungsrichtlinie verdeutlichen, dass durch das Anlegen einer Probefläche das Prinzip W-Cl richtlinienkonform nur dann wirtschaftlich sein kann, wenn ein großflächiger Einsatz bei annähernd gleichmäßiger Chloridbelastung in der Fläche und Rissefreiheit ansteht. Weiterhin zeigen eigene Untersuchungen, dass ein Erfolg des Prinzips W-Cl v.a. dann zu erreichen ist, wenn noch keine Bewehrungskorrosion eingesetzt hat, der Chloridgehalt an der Bewehrung aber über dem nach Rili-SIB kritischen Wert von 0,5 M.-%/z. liegt.

Diese Ausführungen belegen, dass W-Cl bei stattfindender Korrosion der Bewehrung letztlich guten Gewissens kaum oder nur für Sonderfälle zu empfehlen ist, da die Risiken gegenüber den möglichen Einsparungen deutlich überwiegen.

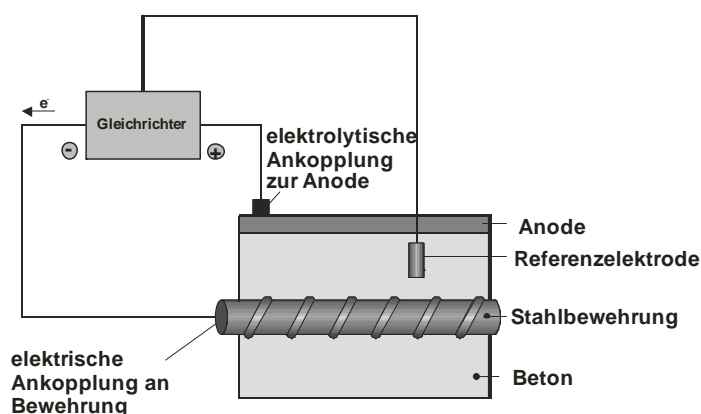
## 5. Instandsetzungsprinzip Kathodischer Korrosionsschutz

### 5.1. Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes

Das Prinzip des elektrochemischen Schutzverfahrens „Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)“ besteht darin, durch Einleitung eines Gleichstromes oder durch Kurzschluss mit einem unedlen Metall (sog. galvanische Anode) den Korrosionsvorgang von unlegierten oder niedriglegierten Stählen (z.B. Betonstahl) in einem ausgedehnten Elektrolyten (Böden, Meerwasser, bei Anwendung in Stahlbeton: Beton) elektrisch zu beeinflussen. Das Aufprägen dieses Gleichstroms (Schutzstrom) bewirkt eine Verschiebung des elektrochemischen Potentials des zu schützenden Metalls in negative Richtung, wodurch die Metalloberfläche kathodisch polarisiert wird und schädigende Korrosion unterbunden wird.

Bildlich ausgedrückt: durch den kathodischen Schutz werden von außen in den Korrosionsprozess (siehe *Bild 3*) so viele Elektronen „gepumpt“, dass der Elektronenüberschuss im Metall der anodischen Teilreaktion entgegengewirkt und diese dadurch maßgebend verlangsamt abläuft. Dabei ist es für die kathodische Schutzwirkung unerheblich, ob der Schutzstrom mit galvanischen Anoden oder durch eine Gleichspannungsquelle erzeugt wird.

Bei KKS-Systemen mit Fremdstrom muss zur Aufprägung eines Schutzstroms zunächst eine dauerhafte und korrosionsresistente Anode (Inertanode, z.B. Titan) an den Beton angekoppelt und an den Pluspol eines als Spannungsquelle dienenden Gleichrichters angebracht werden. Der Minuspol der Gleichspannung wird an die Bewehrung angeschlossen, siehe *Bild 8*. Nach Einschalten der Gleichspannung wird die Bewehrung kathodisch polarisiert und die Stahlkorrosion weitgehend unterbunden.



*Bild 8: KKS als Fremdstromsystem für Stahlbetonbauwerke*

Durch die Betrieb eines KKS-Systems entsteht ein elektrisches Feld zwischen der Bewehrung (Kathode) und der Anode (gleichgültig, ob Opferanode oder Inertanode mit Fremdstrom): alle positiv geladenen Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) wandern zur Bewehrung und alle negativ geladenen Ionen ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) wandern von der Bewehrung weg in Richtung Anode. Dies führt als positive Konsequenz zum einen zu einer „Entsalzung“ in der Nähe der Bewehrung über die Zeit (wie auch beim Elektrochemischen Chloridentzug). Dies kann die potentielle Korrosionsgefährdung für die Bewehrung u.U. erheblich reduzieren. Zum anderen führt eine Bildung von  $\text{OH}^-$ -Ionen (hervorgerufen durch den kathodischen

Schutz) zu einer Erhöhung der Alkalität nahe der Bewehrung, wodurch der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt erhöht und somit der Korrosionsschutz der Bewehrung verbessert wird.

Zur laufenden Überwachung der Funktion der KKS-Anlage bzw. des funktionierenden Schutzes des Stahlbetonbauteils werden üblicherweise Referenzelektroden eingebaut. Diese sind möglichst nahe der zu schützenden Bewehrung anzubringen, um bei späteren Potentialmessungen den Einfluss des Betonelektrolytwiderstands klein zu halten. Als einfach zu ermittelndes und zugleich sicheres Verfahren zur Beurteilung bzw. Überprüfung von kathodischen Schutzanlagen haben sich Depolarisationsmessungen durchgesetzt. Bei diesen Messungen wird das Schutzsystem ausgeschaltet und der anschließende Abfall des Stahl/Beton-Potentials gemessen und registriert. Bei Betonstahlbewehrung in Beton ist nach DIN 12696:2000-06 eine 100 mV-Depolarisation innerhalb von 24 h anzustreben, was bei Annahme einer Steigung der anodischen Tafelgeraden von 100 mV/dec der Verringerung der Korrosionsschutzdichte durch den KKS um eine Dekade entspricht.

Der große Vorteil des kathodischen Korrosionsschutz im Vergleich zu herkömmlicher Instandsetzung liegt deshalb in der ständigen Wartungs- und Kontrollmöglichkeit: sowohl die Funktion der KKS-Anlage als auch das Erreichen der Schutzkriterien kann jederzeit (bei den meisten Anlagen per Funkmodem über Fernabfrage) abgerufen und kontrolliert werden. Dagegen kann der Erfolg einer konventionellen Instandsetzung („Unterbindung der Korrosion der Bewehrung“) üblicherweise nicht oder nur stichprobenhaft überprüft werden.

## 5.2. Anodensysteme

Als Anodensysteme haben folgende Typen von Anoden eine größere Anwendung gefunden [10]:

- **Karbon-Anoden:** diese sind bei trockenen Umgebungsbedingungen und niedrigen erforderlichen Schutzstromdichten bei geringen Lebensdauern zu empfehlen.
- **Thermisch gesprühte Metall-Anoden:** diese können auch bei komplexen Oberflächenstrukturen eingesetzt werden. Empfohlen werden hohe Umgebungsfeuchten (Unterwasserbereich), um eine ausreichend hohe Treibspannung sicher zu stellen. Auch hier sind keine lange Nutzungsdauern zu erwarten.
- **Leitfähige Beschichtungen:** empfohlen bei niedrigen erforderlichen Schutzstromdichten. Langzeiterfahrungen liegen kaum vor.
- **Titanbasierte Anoden:** für diesen Typ von Anoden liegen die meisten Langzeiterfahrungen vor. Nach [11] kann von einer langen Lebensdauer auch bei hohen Schutzstromdichten und alternierenden Expositionen ausgegangen werden.

Die häufigsten Anwendungen erfolgen mit netz- oder bandförmigen Titananoden in zementöser Ankoppelung und diskreten Titan-Stabanoden, die in Bohrlöcher eingebettet werden, siehe *Bild 9*.

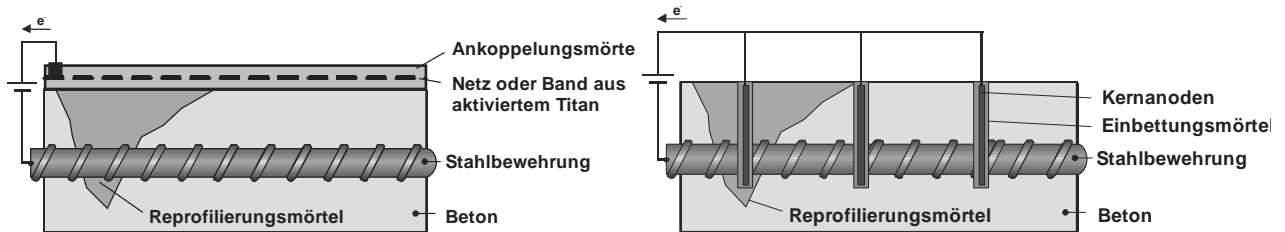


Bild 9: Systemaufbau mit aktiviertem Titanetz (links) und mit Kernanoden (rechts)

Anoden aus MMO-beschichtetem Titan wurden für den kathodischen Schutz von Stahl in Beton erstmals 1985 eingesetzt und sind heute am weitesten verbreitet. Dieses Anodenmaterial zeichnet sich durch eine hohe Langlebigkeit (rd. 25 Jahre) aus – die Lebensdauer wird praktisch nur durch die Einbettmasse bestimmt. Die Anodennetze und -bänder werden mit einem speziellen Ankoppelungsmörtel an den Beton angekoppelt und ermöglichen eine sehr gleichmäßige Schutzstromverteilung. Stabanoden werden in Bohrlöcher des Konstruktionsbetons montiert. Das Bohrloch wird mit einem zementgebundenen, hochalkalischen, schwindfreien Mörtel hinterfüllt, welcher den elektrolytischen Kontakt zwischen Anode und Konstruktionsbeton herstellt. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen muss beim Einbau der Anoden darauf geachtet werden, dass diese nicht in elektrischen Kontakt mit Bewehrungsstahl oder sonstigen Stahlbauteilen (z.B. Rödeldraht) kommen.

### 5.3. Anwendungsbeispiele

Wichtig für die Anwendbarkeit des Kathodischen Korrosionsschutzes ist, dass die Schädigung durch die Korrosion des Stahls noch nicht soweit fortgeschritten ist, dass die Tragfähigkeit des Bauwerks nicht mehr garantiert werden kann (vergleiche *Bild 2*). Der vorhandene Querschnittsverlust der Bewehrung infolge Korrosion ist deshalb durch eine umfassende Bauwerksdiagnose festzustellen und ggf. die Tragfähigkeit rechnerisch nachzuweisen.

Häufige Anwendungen einer erfolgreiche und wirtschaftliche Instandsetzung mit KKS sind folgende Bauwerk- bzw. Bauteilgruppen:

- **Zwischendecken und Bodenplatten von Parkhäusern und Tiefgaragen:** aufgrund der starken Chloridexposition sind diese horizontalen, direkt befahrenen Bauteile besonders häufig stark von Korrosion betroffen, v.a. dann, wenn eine Beschichtung fehlt bzw. nicht mehr funktionsfähig ist und Risse (v.a. Trennrisse) die tragende Bewehrung kreuzen. Ein Großteil der in den letzten Jahren in Deutschland ausgeführten KKS-Anwendungen bei Stahlbauwerken waren solche Parkflächen. Hier kamen meist Anoden aus Titanetzen oder eingeschlitzten Titanbändern zum Einsatz, neuerdings auch leitende Beschichtung.
- **Stützen- und Wandfüße von chloridexponierten Parkflächen und Straßen:** durch Einsatz eines KKS-Systems kann meist auf kostenintensive Abstützmaßnahmen verzichtet werden. Eingesetzt werden häufig netzartige Anoden ggf. in Kombination mit Kernanoden bei besonders hohen Bewehrungsgehalten.

- **Konsolbereiche bei Dehnfugen:** gelangt chloridhaltiges Wasser durch z.B. undicht gewordene Dehnfugen an Konsolbereiche, ist eine erhöhte Korrosionsgefahr durch evtl. vorhandene Rissbildung an der Konsole gegeben. Gerade an hochbelasteten Konsolen Betonaustausch durchzuführen, ist auf Grund der massiven Eingriffe in die Bausubstanz problematisch. Aus diesem Grund stellt gerade an solchen Stellen der Einsatz eines KKS-Systems mit Titanbändern oder -kernanoden eine sinnvolle Instandsetzungsvariante dar.
- **Hohlkastenbodenplatten bei Spannbetonbrücken:** es kommt immer wieder vor, dass infolge mangelnder Wartung der Entwässerung von Brücken, chloridhaltige Wässer über längere Zeiträume in Spannbetonhohlkästen ansteht und die Konstruktion schädigt. Ein Abtrag des chloridbelasteten Betons ist aus Gründen der Bauausführung (meist nur sehr dünne Bodenplatte mit der Gefahr des „Durchschießens“ bei HDW-Strahlen) und aus Gründen der Tragsicherheit (Stichwort: Torsionssteifigkeit) meist problematisch. Auch hier stellt KKS mit Titanbändern oder -netzen eine sinnvolle Alternative dar.

Weitere Bauteile, bei denen KKS erfolgreich eingesetzt wurde sind: Tunnel, Brücken aus Walzträgerim-Beton-Konstruktion, Meeresbauwerke aus Stahlbeton wie Kaimauern, Trockendocks, Stahlbetonkonstruktion mit Fußgängerverkehr (z.B. Laubengänge, Einkaufspassagen), etc.

#### 5.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, z.B. [12], zeigen, dass der Einbau und Betrieb eines KKS-Systems gegenüber einer herkömmlichen Instandsetzungsmaßnahme (Abtrag des chloridbelasteten Betons und Reprofilierung mit anschließender Beschichtung) bei Betrachtung der reinen Baumaßnahmen nicht per se „billiger“ ist. So erhalten bei Ausschreibungen, bei denen die Preise beider Instandsetzungskonzepte abgefragt werden, in vielen Fällen die konventionellen Instandsetzungen den Zuschlag.

Häufig sind aber Randbedingungen vorgegeben, die den Einsatz eines KKS-Schutzes für Stahlbetonbauten in der Gesamtbetrachtung gegenüber der konventionellen Instandsetzung deutlich wirtschaftlicher gestalten. Hierzu einige Beispiele:

- **Kosten für Abstützungsmaßnahmen:** bei konventionellen Instandsetzungsmaßnahmen fallen durch die Entfernung von Beton, der sowohl als Druckzone wie auch zur Übertragung der Zugkräfte der Bewehrung infolge Verbund erforderlich ist, und der während der Baumaßnahme verringerten Tragfähigkeit z.T. sehr hohe Kosten für Abstützungsmaßnahmen an. So sind üblicherweise Lasten in Stützen, Deckensystemen und Unterzügen während der Baumaßnahme sicher abzuleiten.  
So konnte bei einer durchgeführten Baumaßnahme der Lastabtrag der Bodenplatte bei anstehendem Grundwasser nach Entfernen des chloridbelasteten Betons nicht mehr nachgewiesen werden. Die deshalb erforderlichen Maßnahmen für Auflasten und Abstützung hätten den Kos-

tenrahmen einer herkömmlichen Instandsetzungsmaßnahme bei weitem gesprengt, so dass die Installation eines KKS-Systems die wirtschaftlichste Alternative war.

- **Verkürzung der Bauzeit:** KKS-Systeme können in den meisten Fällen im Vergleich zu herkömmlichen Instandsetzungen in kürzeren Bauzeiten installiert werden. Durch Reduktion des Nutzungsausfalls kann ein KKS-System wirtschaftlicher werden.
- **Reduktion des Baulärms und der Staubentwicklung** und der dadurch bedingten Reduktion von Mietminderungen bei Einbau eines KKS-Systems.
- **Verminderte Zugänglichkeit:** wenn Chloridbelastung an unzugänglichen oder schwer zugänglichen Stellen vorliegt, ist KKS häufig die einzige Möglichkeit, einen Rückbau des Bauwerks zu verhindern. Beispiele hierzu sind: Chloridbelastung an der Bauwerksaußenseite durch Meerwasser und chloridhaltige Böden bei Tunneln, Brückenbauteilen, Stützwänden, etc. In [13] ist ein Beispiel von einer Brücke vorgestellt, bei der die Chloridbelastung von einer darüber verlaufenden Fahrbahn herrührt. Da die Brücke bis zu 5 m überschüttet ist, wäre für eine Instandsetzung ein sehr kostenintensives Freigraben und Betonersatz erforderlich gewesen. Durch Einsatz eines KKS-Systems konnten die Kosten gegenüber einer konventionellen Instandsetzung annähernd halbiert werden.
- **Verminderte Eingriffe in die Bausubstanz:** gerade bei Bauteilen, auf die sehr hohe Lasten ruhen (Stützen, Unterzüge, Brückenüberbauten), ist der Abtrag der chloridbelasteten Betonschicht hinsichtlich der Tragfähigkeit sehr problematisch. An den Repofilierungsbeton und die Vorbereitung der neu entstehenden Arbeitsfuge sind häufig sehr hohe Anforderungen zu stellen, was mit erhöhten Kosten und/oder vermehrten Betonabtrag (Austausch des gesamten hoch beanspruchten Tragwerks) verbunden ist. Dadurch, dass beim KKS der hinsichtlich Lasten und Chloriden hochbelastete Beton im Regelfall verbleiben kann, können die Eingriffe in die Bausubstanz minimiert werden.
- **Dauerhaftigkeit von Beschichtungsmaßnahmen:** Nach Durchführung einer konventionellen Instandsetzung werden die Bauteile in den meisten Fällen beschichtet oder abgedichtet. Gerade bei rissüberbrückenden Beschichtungen kann die Lebensdauer bei hoher mechanischen Belastung z.T. unter 10 Jahren liegen. Die Beschichtung muss dann wieder erneuert werden. Bei kathodisch geschützten Bauteilen sind Beschichtungen zum Sicherstellung der Dauerhaft nicht zwingend erforderlich (häufig werden aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit starre OS8-Systeme verwendet, die deutlich längere Lebensdauern haben), so dass für die Restnutzungsdauer des geschützten Bauwerks Kosten für Beschichtungsmaßnahmen reduziert werden können.

Ein weiterer Vorteil eines KKS-Systems ist, dass der Zustand des geschützten Bauteils kontinuierlich überwacht werden kann. Schäden können deshalb früher festgestellt werden, was über den Nutzungszeitraum des Bauteils betrachtet, die Instandsetzungskosten reduziert.

## 5.5. Risiken des Kathodischen Korrosionsschutzes

Mögliche negative Konsequenzen durch den Kathodischen Schutz von Stahlbetonbauwerken können sein[10]:

- Bei extrem niedrigen Potentialen kann u.U. erhebliche Wasserstoffentwicklung an der Kathode auftreten. Dieser Effekt führt zu einer gewissen Gefahr wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion bei Spannstählen, sofern solche Stähle im zu schützenden Bauwerk vorhanden sind. In solchen Fällen muss das Schutzpotential entsprechend begrenzt werden, um die Wasserstoffbildung sicher zu verhindern.
- Reduzierung der Verbundwirkung von Bewehrung zu Beton: bei sehr hohen Schutzströmen, die um den Faktor 1000 über den für Stahlbeton üblichen Schutzstromdichten lagen, wurde eine Reduzierung der Verbundfestigkeiten um rd. 30 % festgestellt. Bei für KKS in Stahlbeton üblichen Schutzstromdichten wurde eine solche Schädigung des Verbundes nicht nachgewiesen.
- Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) durch Erhöhung der pH-Wertes und der Alkalikonzentration (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) im Bereich der geschützten Bewehrung: hier sollte überprüft werden, ob bei der Herstellung des zu schützenden Bauwerks alkaliempfindliche Zuschläge (Opalsande, Flint oder präkambrische Grauwacke) verwendet wurde. Ggf. müssen flankierende Maßnahmen (Reduzierung der Schutzströme oder des Wassergehaltes des Betons) ergriffen werden.
- Ansäuerung im Bereich der Anode mit Entstehung von sehr niedrigen pH-Werten im Bereich der Anode, wodurch es zu einer elektrolytischen Entkoppelung von Anode zu Ankoppelungsmörtel kommen kann. Um dies zu verhindern, ist gegebenenfalls für entsprechende Belüftung und Reduzierung der Stromdichten an den Anoden zu sorgen.

Um die letztgenannten möglichen nachteiligen Effekte des Kathodischen Korrosionsschutzes zu unterbinden, sind die Schutzströme auf ein Maß zu reduzieren, das erforderlich ist, um die Bewehrung vor Korrosion zu schützen, d.h., unnötig hohe Ströme müssen durch entsprechende Planung, Ausführung und Überwachung des KKS-Systems verhindert werden.

Hinsichtlich der Haftung des Planers lautet die maßgebende Frage, die sich im Rahmen einer Instandsetzungsplanung mit KKS ergibt: Handelt es sich bei dem Kathodischen Korrosionsschutz um eine Maßnahme, die den anerkannten Regeln der Technik entspricht? Diese Fragestellung wurde in letzten Jahren mehrfach von Juristen behandelt. Sowohl Motzke [14] als auch König [15] vertreten dabei die Meinung, dass es sich bei dem Kathodischen Korrosionsschutz um eine Instandsetzungsmaßnahme handelt, die den anerkannten Regeln der Technik entspricht, da KKS seit Oktober 2001 in der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton wie auch seit 2000 in der DIN EN 12696 geregelt ist.

Insofern bestehen nach aktueller Rechtsmeinung keine Bedenken, wenn ein Planer, nachdem er den Bauherrn über die Vor- und Nachteile verschiedener, technisch möglicher Lösungen umfassend aufgeklärt hat, das Instandsetzungsprinzip KKS empfiehlt. Dabei muss dem Bauherrn u.a. vermittelt

werden, dass evtl. zusätzliche Voruntersuchungen erforderlich sind. Ferner muss sich der Bauherr bewusst über die Tatsache sein, dass mit der Installation eines KKS-Systems nun eine „Maschine“ die Tragfähigkeit seines Bauwerks sicherstellt. Diese „Maschine“ muss über die gesamte Restnutzungsdauer des Bauwerks betrieben (und damit gewartet) werden. Bei Veräußerung des Bauwerks muss der Käufer über diesen Umstand informiert werden. Bei dem Planer eines KKS-Systems muss es sich formal um einen sachkundigen Planer nach Rili SIB handeln.

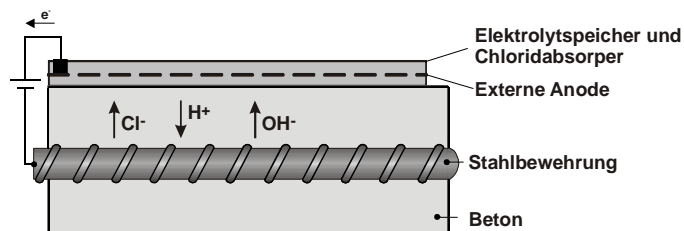
Obwohl das Verfahren des KKS für Stahlbeton anerkannte Regel der Technik ist, ist dennoch für den Einsatz der Materialien im standsicherheitsrelevanten Bereich nach der aktuellen Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau vom Juni 2009 [11] hinsichtlich der bautechnischen Eignung und Dauerhaftigkeit des Anodensystems einschließlich Einbettungsmörtel eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. Da eine solche Zulassung bis dato nicht vorliegt, ist eine projektbezogene **Zustimmung im Einzelfall** des Anodensystems einschließlich Einbettungsmörtel durch die zuständige Bauaufsichtsbehörde zu erlangen. Die Erlangung einer solchen Zustimmung im Einzelfall bei den Obersten Baubehörden erfolgt üblicherweise bei entsprechend fundierten Begründungen und Darlegungen in so kurzen Zeiträumen erfolgt, dass es zu keiner Verzögerung im Planungs- oder gar Bauablauf kommt. Auch die anfallenden Kosten hierfür sind normalerweise moderat.



## 6. Instandsetzungsprinzip Chloridentzug

### 6.1. Prinzip des Elektrochemischen Chloridentzugs

Wie bereits beim Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes im vorangegangenen Kapitel erläutert, führt das Anlegen eines elektrischen Feldes zu einer Migration der Ionen. Diese Wanderung der Ionen wird beim Elektrochemischen Chloridentzug planmäßig genutzt, um Chloridionen aus dem Beton zu entfernen und dabei den Beton an sich zu belassen: die elektrisch negativ geladenen Chloridionen ( $\text{Cl}^-$ ) wandern zum positiven Pol, der Anode. Zur Behandlung wird zwischen der Betonoberfläche (Anode: temporär angebrachtes Titannetz, eingebettet in feuchtgehaltener Zellulosefasermasse, die häufig an einen Ionentauscher angeschlossen ist) und der Bewehrung eine elektrische Gleichspannung angelegt und damit ein Stromfluss von der Bewehrung (Kathode) hin zur Betonoberfläche erzeugt. Die durch die elektrochemische Reaktion an der Kathode entstehenden  $\text{OH}^-$ -Ionen führen zu einer Erhöhung des pH-Werts und befördern somit die Repassivierung der Bewehrung. Die üblichen Stromdichten bei der elektrochemischen Entsalzung liegen bei ca.  $1\text{--}5\text{ A/m}^2$  bei Betriebsspannungen im Bereich  $30\text{--}40\text{ V}$ . Die Anwendungsdauer der Chloridextraktion beträgt rd. 4 bis 8 Wochen, siehe *Bild 10*. Danach können (im Gegensatz zum KKS, bei dem während der gesamten Restnutzungsdauer eine Spannung aufgebracht werden muss) die Anode und der Elektrolytspeicher wieder abgebaut werden. Üblicherweise wird die Betonoberfläche anschließend zur Vermeidung eines erneuten Chlorideindringens beschichtet.



Prinzip des Elektrochemischen Chloridentzugs:

Betriebsspannung zwischen Anode und Kathode: rd.  $30\text{--}40\text{ V}$   
 Stromdichte (bezogen auf Betonoberfläche) rd.  $1\text{--}5\text{ A/m}^2$   
 Anwendungsdauer: rd. 4-8 Wochen

*Bild 10: Prinzip des elektrochemischen Chloridentzugs aus Stahlbeton [16]*

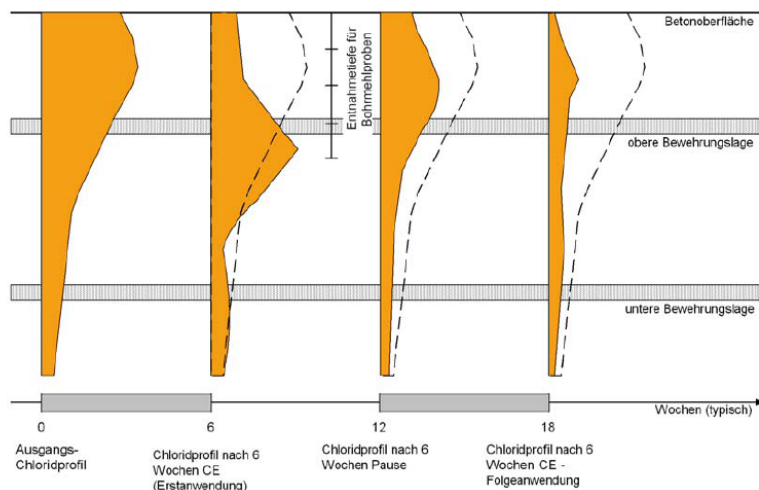
Grundsätzlich werden für den elektrochemischen Chloridentzug folgende Komponenten benötigt:

- eine dimensionsstabile, d.h. beständige Anode – normalerweise ein Netz aus aktiviertem Titan
- ein Elektrolytreservoir, das die Anode einbettet und für einen elektrolytisch leitenden Kontakt zur Betonoberfläche sorgt
- eine Hochstrom-Spannungsversorgung zur Erzeugung des elektrischen Felds zwischen Anode und Bewehrung
- Mess- und Steuereinheiten zur Aufzeichnung bzw. Steuerung von Spannung und Strom und – soweit vorhanden - der Signale an den Referenzelektroden.

Als Elektrolyt kann Leitungswasser verwendet werden. Um eine Ansäuerung der Betonoberfläche durch elektrochemische Reaktionen an der Anode zu verhindern, wird vielfach auch eine alkalische, puffernde Lösung mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oder  $\text{NaOH}$  verwendet. Zur Kompensation von negativen Effekten in Zusammenhang mit AKR kann eine Lithiumborat-Lösung verwendet werden.

## 6.2. Besonderheiten des Elektrochemischen Chloridentzugs

Die Rili-SIB sagt zur Chloridextraktion folgende aus: „Wenn Maßnahmen zur Chloridextraktion ergriffen werden, muss im Einzelfall nachgewiesen werden, dass das Chlorid sicher extrahiert wird und dass Alkalität und Wassergehalt des Betons im Hinblick auf Korrosion langfristig nicht ungünstig verändert werden. Außerdem muss vom sachkundigen Planer überprüft werden, ob die Maßnahmen nicht zu Sekundärschäden am Zementsteingefüge führen. Wegen der Gefahr der Verschleppung von Chlorid in größere Tiefen muss nach der Maßnahme ein Chloridverteilungsprofil bis mindestens 50 mm hinter die Bewehrung ermittelt werden.“ Diese mögliche Verschleppung von Chloriden in größere Tiefen ist exemplarisch in *Bild 11* dargestellt: die hinter der Bewehrungslage befindliche Chloridfracht kann durch das angelegte elektrische Feld weiter ins Bauteilinnere „geschoben“ werden. Diese Chloridfracht wird nach Abschalten der Spannung infolge Diffusion/Kapillarbewegungen wieder an die Betonoberfläche wandern, wo sie bei einem zweiten Extraktions-Zyklus entzogen werden kann. Aus diesem Grund hat sich eine intermittierende Anwendung der Chloridextraktion als zielführend herausgestellt.



*Bild 11: Prinzipskizze zur Veranschaulichung der Wirkung des Chloridentzugs [16]*

Wie bei dem Kathodischen Korrosionsschutz ist auch der Chloridentzug mit einigen Risiken behaftet, auf die nachfolgend nur dann eingegangen wird, wenn sich die Risiken deutlich von denen des KKS unterscheiden:

- **Alkali-Kieselsäure-Reaktion:** Alkalireaktive Zuschlagstoffe werden in hoch alkalischer und feuchter Umgebung zu expansiven Reaktionen angeregt. Der Zusammenhang zwischen Chloridentzug und AKR wurde mehrfach untersucht; demnach gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen Ladungsmenge, Anwendungszeit und AKR-Effekten. Bei Vorhandensein derarti-

ger Zuschläge im Beton ist jedoch eine Prüfung der Anwendbarkeit des Chloridentzugs erforderlich.

- **Chlorgasentwicklung und Ansäuerung der Betonoberfläche:** Ohne entsprechende Vorsichtsmaßnahmen werden durch die anodischen Reaktionen u.U. große Mengen Chlorgas entwickelt und die Betonoberfläche angesäuert. Chlorgas ist nicht nur gesundheitsschädlich, sondern führt in feuchter Umgebung auch zu starken Korrosionsreaktionen an benachbarten metallischen Flächen. Zur Vermeidung dieser Effekte können Ionenaustauscher verwendet werden, die Chlorid binden sowie alkalisch puffernde Elektrolytlösungen
- **Haftverbund zwischen Stahl und Beton:** siehe KKS
- **Anwendung des Verfahrens an Spannbetonkonstruktionen:** Bei den angelegten Spannungen ist die Bildung von molekularem Wasserstoff möglich. Dieser kann in das Gefüge von Spannstählen eindringen und dort wasserstoffinduzierten Sprödbruch verursachen. Daher darf der Chloridentzug nicht an Spannbetonbauteilen mit sofortigem Verbund eingesetzt werden. Anders sieht es bei Spannbeton mit nachträglichem Verbund aus: dort bildet das Spanngliedhüllrohr einen Faradayschen Käfig und verhindert unzulässige Polarisation des innenliegenden Spannstahls. Dieser Schutz ist auch bei geringfügigen Defekten des Hüllrohrs noch voll wirksam [16].

Folgende Abschalt- und somit Erfolgskriterien haben sich in der Praxis bewährt [16]:

- **Chloridgehalt:** der durchschnittliche, aber auch der Chloridgehalt in Bewehrungsnähe sollte maximal 0,4 M.-%/z., bezogen auf die Zementmasse betragen. In Einzelfällen sind in Bewehrungsumgebung maximal 0,8 M.-%/z. zulässig.
- **Ladungsmenge:** in Abhängigkeit vom Korrosionszustand der Bewehrung sollte die Ladungsmenge bei wenig korrodierter Bewehrung ca. 400 Ah/m<sup>2</sup>, bei stärker korrodierter Bewehrung zwischen 1.000 und 2.000 Ah/m<sup>2</sup>, bezogen auf die Stahloberfläche, betragen.
- **Ruhepotentiale:** nach Abbau der Restpolarisation und des erhöhten Wassergehalts kann mit einer wiederholten Potentialmessung der Abbau der Makroelemente nachvollzogen werden – vormals sehr negative Potentiale müssen positiver (und umgekehrt) gemessen werden. Die angestrebte maximale Potentialdifferenz im behandelten Bereich sollte bei ca. 150 mV liegen. In der Regel kann diese Untersuchung erst 4 – 6 Monate nach Abschluss des Chloridentzugs sinnvolle Ergebnisse liefern.

Zwei der drei genannten Kriterien sollen bei einer erfolgreichen Anwendung mindestens erfüllt sein.

Nach [14] ist das Verfahren der Chloridextraktion, dadurch dass es lediglich in der Rili-SIB aufgeführt ist, die Methode aber nicht näher beschrieben ist, keine anerkannte Regel der Technik. Eine Beschreibung des Vorgehens beim Chloridentzug ist in der Rili-SIB nicht zu finden, demnach ist diese Metho-

de mit Risiken behaftet. Das Vorgehen nach dieser Methode bedarf der vertragsrechtlichen Absicherung und der Risikoübernahme durch den Besteller.

### 6.3. Anwendungsbeispiele

Die Kosten einer Chloridextraktion liegen in der gleichen Größenordnung wie für den Kathodischen Korrosionsschutz. Aus diesem Grund sind die bisherigen Anwendungen auf wenige Sonderfälle begrenzt:

- **Bodenplatte einer Hohlkastenbrücke [16]**

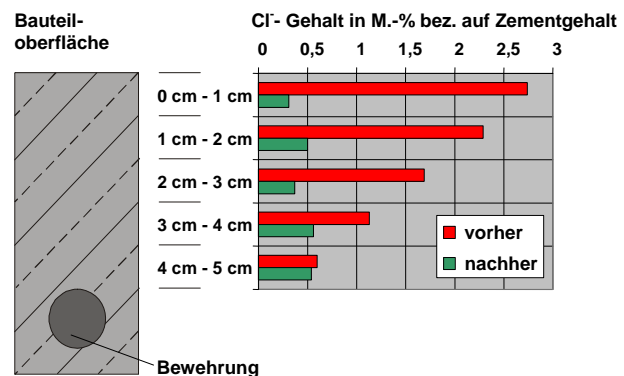
Um Korrosionserscheinungen am Boden eines Hohlkastens einer Spannbetonbrücke, die – wie häufig in solchen Fällen - durch eine defekte Fahrbahntwässerung entstanden waren, dauerhaft zu beseitigen, sollten besonders betroffene Bereiche der Hohlkastenböden mit einem elektrochemischen Chloridentzug behandelt werden. In 2 Behandlungsabschnitten mit 6-wöchiger Pause konnten rd. 72% des ursprünglich festgestellten Chloridgehalts entfernt und ein durchschnittlicher Gesamtchloridgehalt von ca. 0,46 M.-%/z. erreicht werden.



Bild 12: Chloridextraktion an der Bodenplatte eine Brückenhohlkastens [16]

- **Bodenplatte einer Parkgarage [17]**

Die Anwendung einer Chloridextraktion an der Bodenplatte einer Tiefgarage ist in [17] beschrieben.



*Bild 13: Durchführung einer Chloridextraktion in einer Tiefgarage und die Chloridprofile vorher/nachher [17]*

#### 6.4. Chloridentzug durch Eluation

Auf dem Markt finden sich einige Firmen, die Chloridextraktion durch destilliertes (wahlweise auch mit entspanntem oder evithiertem) Wasser als Instandsetzungsvariante anbieten. Das Prinzip dieser Chloridextraktion beruht auf der Auslaugung der Chloride aus dem Beton durch Diffusion: durch ein Konzentrationsgefälle zwischen Beton (chloridhaltig) und Eluat (chloridfrei) kommt es zur Diffusion von Chloridionen aus dem Beton in das salzfreie Medium. Dies entspricht der Umkehr der Diffusion von Chloriden in den Beton. Dieses Prinzip wird bei der Entsalzung von salzbelastetem Mauerwerk durch Aufbringen von sog. Kompressen mit Erfolg angewandt [18]. Nachfolgend werden einige Gesichtspunkte dieses Verfahrens diskutiert werden.

Das Eindringen von Chloriden in Beton ist – anders wie bei diffusionsoffenen Mauerwerksziegeln – ein langsamer, über Jahre und Jahrzehnte dauernder Prozess, da der Chloriddiffusionskoeffizient von Beton in einem Bereich von 1 bis  $10 \cdot 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup> sehr klein und Beton damit relativ dicht gegenüber Chloriden ist. Chloride, die in den Beton eindiffundieren werden chemisch und physikalisch gebunden. Nach [19] sind die Diffusionskoeffizienten für das Eindringen in Beton und das Auslaugen aus Beton annähernd gleich. Dies bedeutet aber, dass für das Auslaugen ähnliche Zeithorizonte anzunehmen sind, wie für das Eindringen der Chloride. Insofern müsste zur Auslaugung eines signifikanten Anteils der Chloride aus dem Beton, der Auslaugungsprozess über Monate bis Jahre ablaufen. In dieser Zeit ist das Bauwerk nur eingeschränkt nutzbar.

Ferner muss beachtet werden, dass auch andere Kationen und Anionen ausgelaugt werden. Dabei sind nach [19] v.a. die OH<sup>-</sup>-Ionen deutlich mobiler als die Cl<sup>-</sup>-Ionen, was letztlich zu einer Verringerung der oberflächennahen pH-Wertes führen wird. Auch werden Ka<sup>+</sup>-Ionen in einem vergleichbaren Maß wie die Cl<sup>-</sup>-Ionen ausgelaugt, wodurch die Pufferungsmöglichkeit des Betons signifikant verringert werden kann.

Dies bedeutet, dass bei einer Chloridextraktion durch Auslaugung die Ionenbewegungen durch entsprechende Untersuchungen genau beobachtet und bewertet werden sollten. Der Instandsetzungserfolg muss – ähnlich wie bei der Elektrochemischen Chloridextraktion – durch Erreichen von Erfolgskriterien nachgewiesen werden. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass diese Methode weder in der Rili-SIB noch in anderen gleichwertigen Regelwerken oder Normen aufgeführt ist. Somit kann nach der Argumentation in [14] diese Instandsetzungsvariante nicht als „Anerkannte Regel der Technik“ angesehen werden kann. Die Auswirkungen auf die mögliche Haftung wurden bereits diskutiert.

### 7. Chloride im Beton als Planungsvorsatz

Wie der vorangegangene Vortrag von Herrn Meier zu unbeschichteten Parkflächen zeigt, kann nach dem Regelwerk so geplant werden, dass Chloride planmäßig in das Betoninnere eindringen kann.

Letztlich ist der Beton so dicht zu entwerfen, dass der Zeitraum, bis an der Bewehrung der kritische Chloridgehalt überschritten wird, in einem vernünftigen Verhältnis zur Nutzungszeit steht. Gleichzeitig besteht die Aufgabe bei solchen unbeschichteten Bauwerken darin, das Eindringen der Chloride kontinuierlich zu verfolgen, um frühzeitig Gegenmaßnahmen treffen zu können.

## 8. Zusammenfassung

Die vorgestellten Instandsetzungsmethoden zeigen, dass chloridbelasteter Beton nicht zwangsläufig ein Entsorgungsfall ist. Chloridbelasteter Beton kann häufig im Bauwerk verbleiben, wenn dessen Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks genau abgeschätzt werden kann. Ferner bieten elektrochemische Methoden wie der Kathodische Korrosionsschutz und der (elektrochemische) Chloridextraktion die Möglichkeit, den Beton auch bei hohen Chloridgehalten nicht entfernen zu müssen und dabei gleichzeitig nach den „Anerkannten Regeln der Technik zu planen.

## 9. Literatur

- [1] DAfStb.-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen, Rili-SIB. Beuth-Verlag, Berlin, 2001
- [2] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. - In: CBI Research (1982), Nr. Fo 4:82.
- [3] Glass, G.K. ; Reddy, B.: The Influence of the Steel Concrete Interface on the Risk of Chloride Induced Corrosion Initiation. Luxembourg: University of Applied Sciences, 2002. - In: Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, COST 521, Final Workshop, Luxembourg, 18-19 February 2002, (Weydert, R. (Ed.)), S. 227-232.
- [4] Comité Euro-International du Béton ; CEB: Durable Concrete Structures CEB Design Guide Second Edition 1989. Lausanne: Comité Euro-International du Béton -CEB-. - In: Bulletin d'Information (1989), Nr. 182.
- [5] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Untersuchungen an Mörtелеlektroden in chloridhaltigen alkalischen Lösungen. Materials and Corrosion Volume 54 Issue 6, Pages 430 – 439
- [6] Weydert, R.: Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Instandsetzungsprinzip W bei Korrosion infolge Karbonatisierung des Betons. Materials and Corrosion Volume 54 Issue 6, Pages 447 – 453
- [7] Eich, G., Burkert, A., Mietz, J.: Entwicklung eines kombinierten Schutzsystems für chloridbelastete Betonflächen aus Spritzverzinkung mit abdichtender Beschichtung. Forschungsvorhaben AiF 12 818 N, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- [8] Raupach, M., Bruns, M.: Instandsetzungsprinzip W-Cl nach RiLi SIB für die Anwendung in chloridkontaminierten befahrbaren Parkdecks.
- [9] Motzke, G.: mündliche Stellungnahme im Rahmen der Podiumsdiskussion. 3. Kolloquium Verkehrsbauten am 29.-30. Januar 2008, TAE Esslingen.
- [10] Eichler, T.: Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahl in Beton. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 20. und 21. November 2008.
- [11] Empfehlung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zu den erforderlichen Nachweisen der Bauprodukte für den Kathodischen Korrosionsschutz im Betonbau. 05.06.2009 (Ersatz für die Empfehlung vom 16.04.2008)
- [12] Pruckner, F.: Lebensdauerauslegung für Betonbauwerke. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 23. November 2007.
- [13] Dauberschmidt, C.; Sodeikat, Ch.; Vestner, S.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit Walzträgern nach dem Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes. Beton- und Stahlbetonbau 11/2009
- [14] Motzke, G.: Vertrags- und haftungsrechtliche Gesichtspunkte bei der Planung und Ausführung von Kathodischem Korrosionsschutz und Chloridextraktion. Beton- und Stahlbetonbau 01/2007.

- 
- [15] König, N.: Haftungs- und vertragsrechtliche Gesichtspunkte bei der Planung und Ausführung von KKS-Projekten. Symposium Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken, Esslingen, 20. und 21. November 2008.
- [16] Schneck, U.: Elektrochemischer Chloridentzug – Erfahrungen aus neun Jahren praktischer Anwendung. TAE-Symposium „Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken“ 26.-27.11.2009, Ostfildern
- [17] Gehlen, Ch.; Schoßmann, A.; Schießl, P.: Instandsetzung eines Parkhauses. Beton- und Stahlbetonbau 9/2002, 493-496
- [18] Kriegel, R., Terheiden, K., Kaps, Ch.: Simulation verfahrenstechnischer Grenzfälle der Kompressenentsalzung – Vergleich der numerischen Simulation mit experimentellen Daten von Labor-Untersuchungen, WTA-Colloquium 2002
- [19] Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. DAfStb-Heft 542, 2003