

Bauwerksdiagnose bei chloridbelastetem Beton

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt

Dipl.-Ing. (FH) Stephan Vestner

id+v

Ingenieurgesellschaft Prof. Dauberschmidt und Vestner mbH

▪ **Zusammenfassung**

Die nachfolgenden Darlegungen zeigen, dass die Bauwerksdiagnose von chloridbelasteten Bauwerken ein komplexer Prozess ist, bei dem viele Randbedingungen zu beachten sind. Eine zielgerichtete und wirtschaftliche Bauwerksdiagnose sollte immer schon die angestrebte Instandsetzungskonzeption und die für die Instandsetzungsplanung erforderlichen Informationen berücksichtigen. Hier sind die Abstimmungen zwischen Planer und Prüfer besonders gefragt, wobei zumindest die Anwesenheit des Planers bei der Bauwerksdiagnose hilfreich ist. Eine Bauwerksdiagnose „von der Stange“ mag auf den ersten Blick zwar billiger sein, über den gesamten Planungs- und Instandsetzungsprozess betrachtet sind aber abgestufte und „maßgeschneiderte“ Untersuchungen meist kostengünstiger.

1. Einleitung

Wer sehenden Auges eine ältere Tiefgarage aus Stahlbeton betritt, die nicht Instand gesetzt wurde, erkennt oft sehr schnell, dass der „Zahn der Zeit“ an der Konstruktion nagt: häufig sind an den Stützenfüßen Abplatzungen über der Bewehrung feststellbar, die Bewehrungsstäbe korrodieren, teilweise sind auf den horizontalen Verkehrsflächen infolge unzureichender Entwässerung Salzablagerungen zu sehen und nicht selten sind einzelne Bewehrungsstäbe komplett „durchgerostet“. Dieser „Zahn der Zeit“ ist die durch Chloridbelastung hervorgerufene Schädigung des Bauwerks, deren Ausmaß nur bei starker Schädigung von außen zu erkennen ist. Denn vergleichbar zu einem Krebsgeschwür „arbeiten“ die Chloride lange Zeit verborgen im inneren der Konstruktion. Um nun eine dem Schadensbild angepasste und wirtschaftliche Instandsetzung planen zu können, muss der momentane Schädigungszustand möglichst zerstörungsfrei ermittelt werden, wobei je nach angewandtem Instandsetzungsprinzip der Schwerpunkt der Bauwerksdiagnose anders gelegt werden sollte.

Nachfolgend werden zunächst die Schädigungsmechanismen kurz erläutert und dann die nach der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen“ des DAfStb (Rili-SIB) [2] zulässigen Instandsetzungsprinzipien dargestellt. Erst danach werden die gängigen Methoden der Bauwerksdiagnose vorgestellt. Diese Reihenfolge soll zeigen, dass man auch eine Bauwerksdiagnose immer vom Ende (der Instandsetzungsplanung) her planen soll. Dem folgen Vorschläge zum Ablauf einer Bauwerksdiagnose für beispielhafte Bauteile und Instandsetzungsprinzipien.

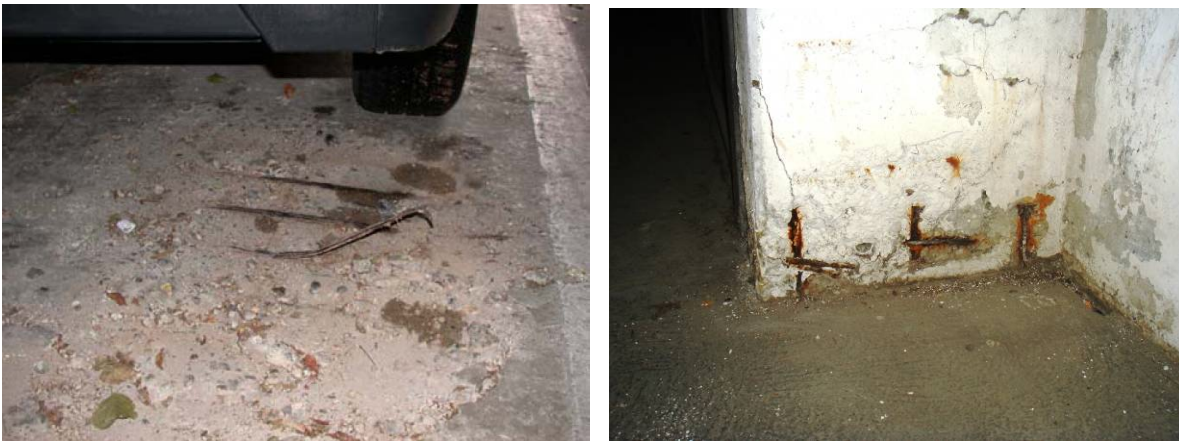


Bild 1: Typische sichtbare Schädigungen in einer Parkgarage: links: zerstörte Betondeckung mit eingeschränkter Verkehrssicherheit [1]; rechts: Freiliegende und korrodierende Bewehrung an einem Stützenfuß

2. Chloridbelastung von Stahlbetonbauwerken

Einleitungsphase

Die Besonderheit der Baustoffkombination Stahl-Beton liegt neben den abgestimmten Tragfähigkeiten der Materialien auch darin, dass der Beton den eingebetteten Betonstahl vor Korrosion schützt. 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.

Dieser Korrosionsschutz 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 CO_2 aus der Umgebungsluft in den Beton ein und durch Bildung von CaCO_3 bei Verbrauch von 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 Stahlbetons durch Chloride erst nach Beginn der Korrosion stattfindet.

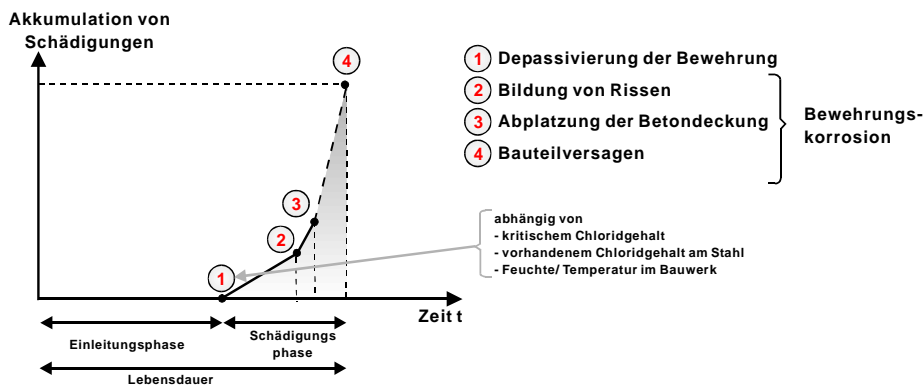


Bild 2: Zeitlicher Ablauf der akkumulierten Schädigungen an Bauwerken mit chloridinduzierter Korrosion [3]

Schädigungsphase

Bei der Korrosion (z.B. der Lochfraßkorrosion) von Stahl in Beton gehen positiv geladene Eisenionen (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 (OH^-) aufgenommen, so dass sowohl im Eisen als auch im Elektrolyten das Ladungsgleichgewicht erhalten bleibt. Die Eisenauflösung (Bildung von Fe^{2+}) wird als anodischer Teilprozess, die Bildung von Hydroxydionen (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

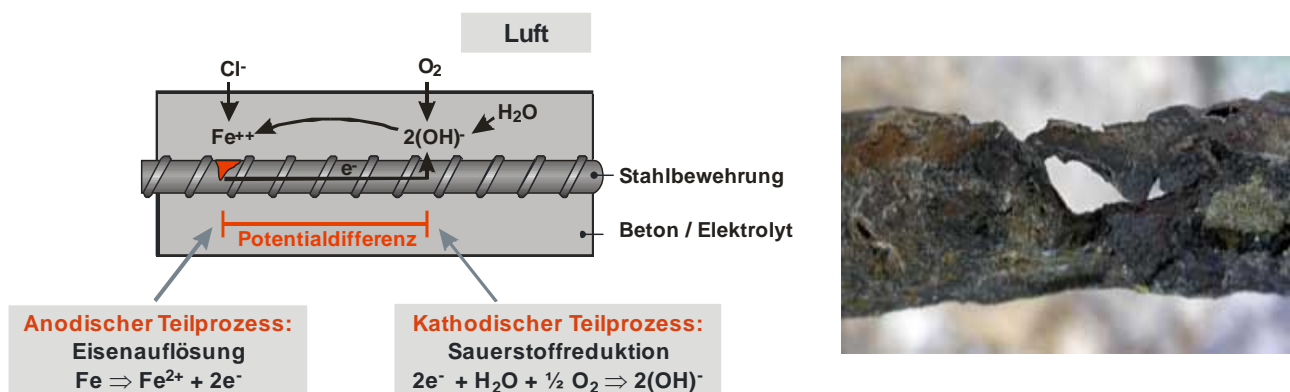


Bild 3: Schematische Darstellung der Korrosion von Betonstahl, links und durch chloridinduzierte Korrosion geschädigter Stahl, rechts, [13]

Die „Gefährlichkeit“ der chloridinduzierten Lochfraßkorrosion von Stahl im Beton besteht in der Kombination von hohen Korrosionsraten des Stahls bei gleichzeitiger Nicht-Sichtbarkeit des Schädigungsprozesses von außen. Die Lochfraßkorrosion 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. Gleichzeitig laufen diese Schädigungsprozesse im Inneren des Bauteils ab: 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.

Ansatz des kritischen Chloridgehaltes

Der Gehalt an Chloridionen, bei dem schädigende 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, deren Einflüsse noch nicht erforscht sind. Z.B. spielen die Expositionsbedingungen eine große Rolle: so erhöht sich der kritische Chloridgehalt, bei dem es zu einer Schädigung des Bauwerks kommt, bei sehr hohen Wassergehalten (Sauerstoffarmut im Beton) genauso wie bei sehr trockenen Betonen, bei denen der hohe Betonwiderstand den Korrosionsprozess zum Erliegen bringen kann

Die Höhe des anzusetzenden kritischen Chloridgehaltes wird derzeit kontrovers diskutiert. Dabei werden häufig anhand von Forschungsergebnissen argumentiert, ohne dass auf die Untersuchungsparameter eingegangen wird. Hierzu ein Beispiel: Breit [4] hat Untersuchungen an Mörtелеlektroden durchgeführt und dabei die Elektroden während der Untersuchung auf + 500 mV vs. Wasserstoffelektrode polarisiert. Dies führt dazu, dass jegliche Verletzung des Passivfilms zu einer Depassivierung des Stahls führt. Es wurde also ein kritischer Chloridgehalt bestimmt, ab dem es bei einer hohen Polarisation des Stahls (wie sie in einem Bauwerk nie stattfinden wird) zu einer Depassivierung des Stahls kommen kann. Dieser kritische Chloridgehalt kann also nur bedingt als Grenzwert zur Beurteilung des Korrosionsrisikos am Bauwerk eingesetzt werden. Neuer Laboruntersuchungen [5] bei geringerer Polarisation liefern entsprechend höhere kritische Chloridgehalte, siehe Bild 4.

Welche Chloridwerte am Bauwerk zu Korrosion führen können, wurde in einer umfangreichen Untersuchungsreihe an Brücken in Norwegen durchgeführt (dabei wurden über 4600 Chloridprofile erstellt!) [6]. Als Ergebnis wurde ein Chloridwert, ab dem Korrosion an der Bewehrung feststellbar ist, zu 0,79 M.-%/z. (Mittelwert) ermittelt. Der Chloridwert, bei dem keine Korrosion an einem Stahl fest-

zustellen war, betrug 0,4 M.-%/z. In Bild 4 wurden diese beiden Punkte vereinfacht mit einer Geraden verbunden.

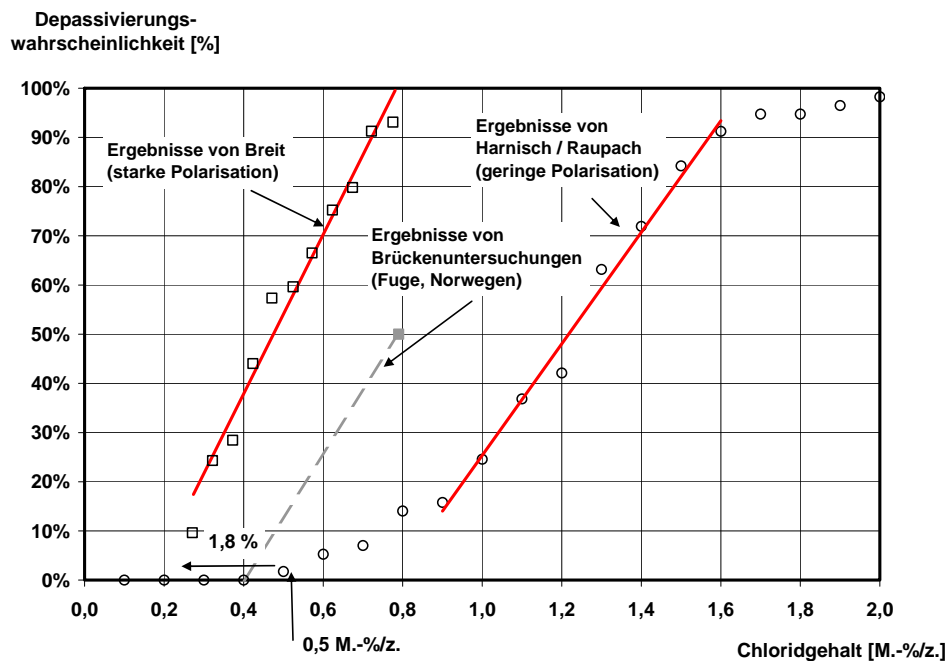


Bild 4: Depassivierungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Chloridgehalte bei geringer Polarisation und bei starker Polarisation, sowie Ergebnisse von Brückenuntersuchungen aus Norwegen [4], [5], [6]

Die Rili-SIB gibt als Grenzwert, ab dem ein sachkundiger Planer eingeschaltet werden soll, 0,50 M.-% bezogen auf den Zementgehalt an. Dieser Wert ist, wie oben gezeigt, durch entsprechende Untersuchungsergebnisse als unterer Wert der Depassivierungswahrscheinlichkeit bei praxisrelevanten Untersuchungsrandbedingungen nachgewiesen. Somit ist der Ansatz eines kritischen Chloridgehaltes von 0,50 M.-%/z. bezogen auf den Zementgehalt als Allgemein Anerkannte Regel der Technik zu bewerten, sofern der den Stahl umgebende Beton nicht besonders porig oder durch Auswaschungsprozesse eluiert ist.

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.

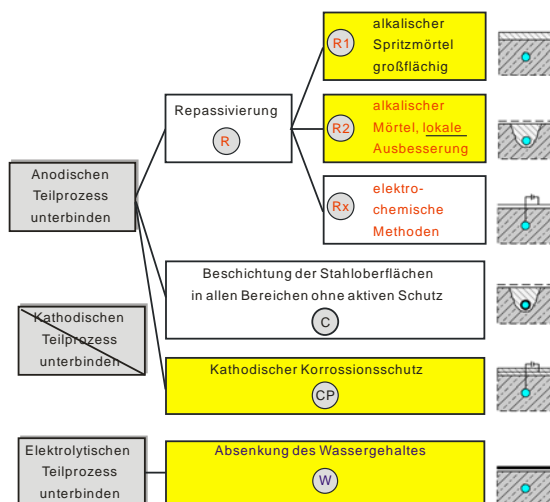


Bild 5: Korrosionsschutzprinzipien nach Rili-SIB mit Kennzeichnung der in der Praxis eingesetzten Prinzipien

Aus diesen technischen Möglichkeiten, den Korrosionsprozess zu unterbinden, ergeben sich die grundsätzlichen Korrosionsschutzprinzipien nach der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [2]:

- 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. Bei den beiden anderen in der Praxis eingesetzten Instandsetzungsprinzipien, Prinzip W-Cl und Prinzip K muss der chloridbelastete Beton nicht entfernt werden. Diese beiden Methoden werden in späteren Kapiteln kurz vorgestellt.

4. Methoden der Bauwerksdiagnose für chloridbelastete Bauteile

Allgemeines

Nachfolgend werden die maßgebenden Prüfmethode zur Beurteilung des Schädigungsgrads von chloridbelasteten Bauteilen kurz vorgestellt: dies sind v.a. die Potentialfeldmessung, die Betondeckungsmessung, die Erstellung von Chloridprofilen und die Erstellung von Sondierungsöffnungen. Im Vorfeld solcher Untersuchungen sollte aber immer die Inaugenscheinnahme durch einen Sachkundigen Planer stehen: dieser kann mit einem entsprechenden Erfahrungsschatz die Besonderheiten eines Bauwerks wie z.B. Konstruktionsart, Dehnfugen, Gefällesituation, Entwässerung usw. erfassen und bewerten. Auf Grundlage dieser ingenieurmäßigen Inaugenscheinnahme kann die Durchführung einer Bauwerksdiagnose erst sinnvoll geplant werden.

Begleitet werden sollte die Bauwerksdiagnose von einer Aufnahme der erkennbaren Schädigungen wie Risse, Verfärbungen, Ausblühungen oder Abplatzungen im Vorfeld, sowie einem Abklopfen der Oberfläche zur Ortung von Hohlstellen.

Potentialfeldmessung

Die elektrochemische Potentialfeldmessung ist ein Verfahren zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen. Grundlagen und Ausführungshinweise sind im 2008 überarbeiteten Merkblatt B3 der DGZfP [7] enthalten. Dabei können Bereiche mit hoher Korrosionswahrscheinlichkeit durch die Messung der elektrochemischen Potentialdifferenz lokalisiert werden. Zur Erfassung des aktuellen elektrochemischen Potentials an der Grenzfläche Stahl/Beton des unter der Betonoberfläche liegenden Bewehrungsstahls werden die an der Oberfläche ankommenden Potentiale gemessen. Dies geschieht mit einem hochohmigen Voltmeter, das an einem freigelegten Bewehrungsstahl angeschlossen ist und das mit einer Bezugs- oder Referenzelektrode verbunden ist (Bild 6).

Durch Entlangführen der Referenzelektrode über die Betonoberfläche, sind korrosionsaktive Stellen mit einem entsprechenden Elektrodenüberschuss (damit negativ aufgeladen, siehe Bild 3) durch

niedrigere Potentialwerte detektierbar, siehe Bild 6. Zur Bewertung der Korrosionsaktivität können die Potentiale großflächig farbcodiert dargestellt werden (Bild 7).

In Bereichen mit ausgeprägten Potentialgradienten ist von einer großen Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung auszugehen. Allerdings ist die Angabe von festen Grenzwerten nicht zielführend, wie Bild 8 zeigt: im passiven Zustand kann der Potentialbereich der Bewehrung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern über einen recht großen Bereich (mehrere 100 mV) schwanken. Allein aufgrund der Potentialwerte ist eine eindeutige Zuordnung aktiver (korrodierender) oder passiver Bewehrungszustände nicht möglich.

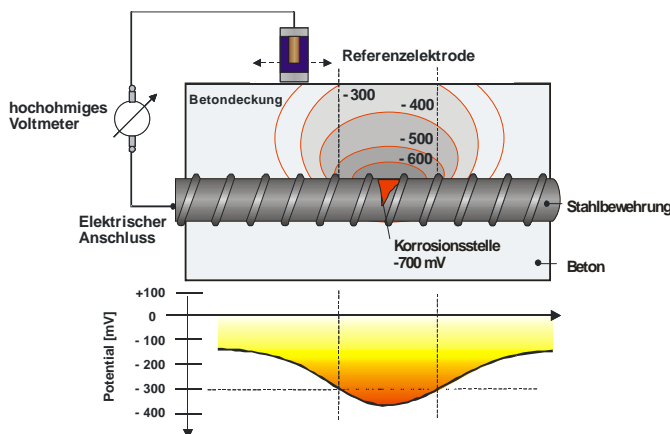


Bild 6: Prinzipskizze der elektrochemischen Potentialmessung, in Anlehnung an [7]

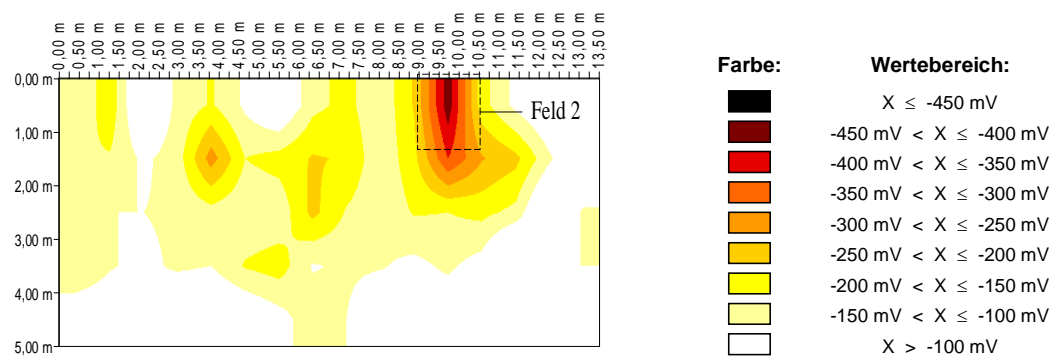


Bild 7: Ergebnisdarstellung einer Potentialfeldmessung für eine Tiefgaragen-Zwischendecke mit ausgeprägten Potentialgradienten; Potentialangaben vs. Cu/CuSO₄ [10]

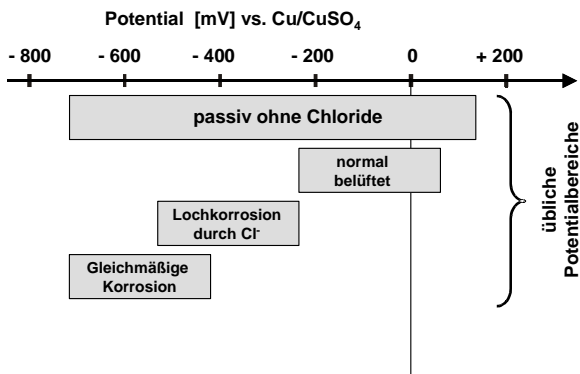


Bild 8: Übliche Potentialbereiche von Bewehrungsstahl [7]

Das Verfahren stellt eine relativ preiswerte Möglichkeit zur Ortung von korrosionsaktiven Bereichen – vorzugsweise bei tausalzinduzierter Korrosion - dar. Es ermöglicht jedoch keine Messung des Stadiums der Korrosion (Querschnittsverlust der Bewehrung) oder der Korrosionsrate. Die Durchführung der Messungen und die Interpretation der Messergebnisse muss einem Spezialisten vorbehalten sein. Eine unkritische Anwendung kommerzieller Geräte kann unter Umständen zu erheblichen Fehlinterpretationen führen [8].

Eine weitere Möglichkeit, die Aussagekraft einer Potentialfeldmessung zu erhöhen, ist die Bestimmung der Potentialgradienten. Der Gradient ist eine Funktion eines Skalarfeldes, welche die Änderungsrate und die Richtung der größten Änderung in Form eines Vektorfeldes angibt, oder, in Bezug zu einer Potentialfeldmessung, die größte Änderung eines Potentialwertes zu seinen Nachbarpotentialwertes pro Längeneinheit in mV/m.

Untersuchungen in [10] haben gezeigt, dass Gradienten unter 100 mV/m als unkritisch einzustufen sind, während bei steigenden Gradientenwerten über 100 mV/m mit einer steigenden Korrosionswahrscheinlichkeit zu rechnen ist. Bild 9 verdeutlicht den Informationsgewinn durch Gradientenberechnung: die Potentialwerte einer wassergesättigten Bodenplatte weisen eindeutig auf eine hohe Korrosionswahrscheinlichkeit hin. Allerdings sind die abgeleiteten Potentialgradienten in Wertbereichen, die als unkritisch anzusehen sind. Letztlich wurde an diesem Bereich keine Korrosion der Bewehrung festgestellt, der Beton der Bodenplatte war lediglich so weit wassergesättigt, dass Sauerstoffarmut an der Bewehrung vorlag. Dies führt zu sehr tiefen, aber in der Fläche gleichmäßigen Potentialen.

Das Verfahren stellt eine relativ preiswerte Möglichkeit zur Ortung von korrosionsaktiven Bereichen – vorzugsweise bei chloridinduzierter Korrosion - dar. Es ermöglicht jedoch keine Messung des Stadiums der Korrosion (Querschnittsverlust der Bewehrung) oder der Korrosionsrate. Die Durchführung der Messungen und die Interpretation der Messergebnisse muss einem Spezialisten vorbehalten sein. Eine unkritische Anwendung kommerzieller Geräte kann unter Umständen zu erheblichen Fehlinterpretationen führen [8].

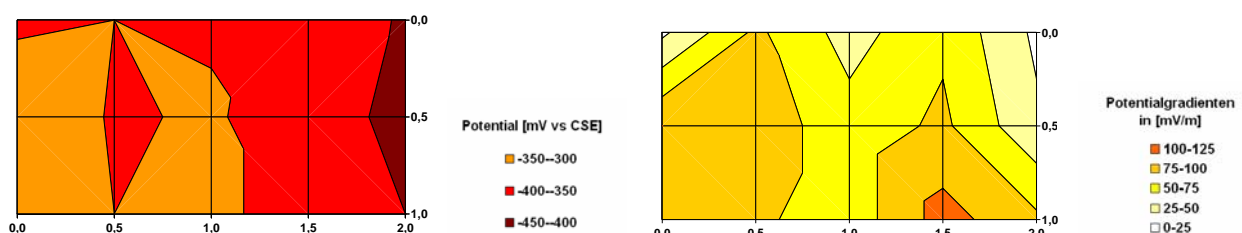


Bild 9: links: Potentiale einer Bodenplatte im Grundwasser; rechts: daraus errechnete Potentialgradienten [10]

Betondeckungsmessung

Potentialfeldmessungen und Chloridprofile können erst vollständig bewertet werden, wenn die Betondeckung der Bewehrung bekannt ist. Dazu werden üblicherweise zerstörungsfreie Betondeckungsmessungen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens durchgeführt. Mit diesem Verfahren wird die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen einer Induktionsspule und dem im Bewehrungsstab induzierten Wirbelstrom ausgenutzt. Dabei wird der komplexe Wechselstromwiderstand (Impedanz) der Induktionsspule gemessen. Über eine Regressionsanalyse können daraus Betondeckung und/oder Durchmesser des Bewehrungsstabes bestimmt werden. Je nach eingesetztem Messgerät sind linienförmige und flächenhafte Messungen möglich, siehe Bild 10.

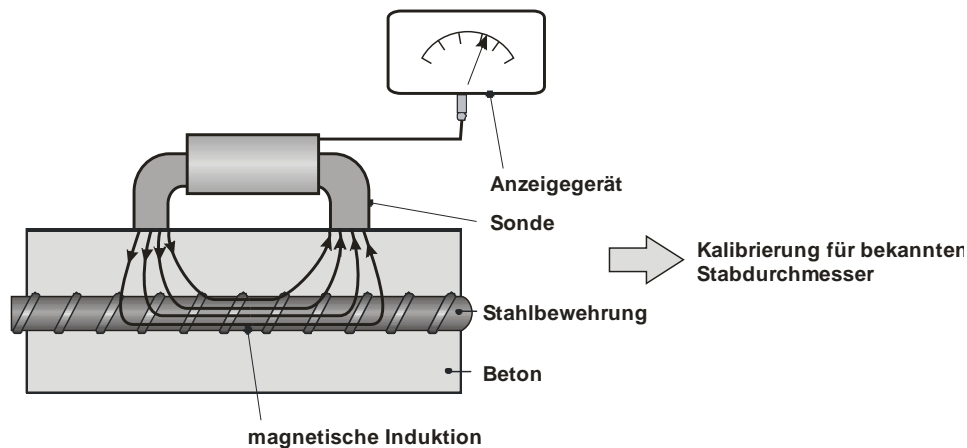


Bild 10: Funktionsprinzip der Betondeckungsmessung nach dem Wirbelstromverfahren

Bestimmung der Elektrolytwiderstände

Bei der Potentialfeldmessung werden häufig hohe Potentialgradienten ermittelt, die auf unterschiedliche Feuchte- und Belüftungszustände des Betons zurückzuführen sind. Dies können z.B. der Feuchteunterschied zwischen stark und weniger stark beparkten Stellplätzen, Stützenfüße mit Wasserkontakt oder Bauteilen im Grundwasser sein. Solche ausgeprägten Potentialgradienten können zu Fehlinterpretationen führen.

Um nun den Feuchtezustand mit in der Bewertung berücksichtigen zu können, bietet es sich an, den Elektrolytwiderstand des Überdeckungsbetons zu ermitteln. Der Elektrolytwiderstand eines Betons korreliert stark mit dessen Feuchtegehalt: trockener Beton hat einen sehr hohen Elektrolytwiderstand (über 100.000 Ωm), wassergesättigter Beton einen sehr niedrigen (unter 100 Ωm).

Eine einfache Baustellenmethode zur Bestimmung des Elektrolytwiderstandes ist die sog. Ein-Elektroden-Messung. Bei dieser Messmethode wird eine Messelektrode auf die Betonoberfläche

aufgesetzt. Mit Hilfe eines LCR-Messgerätes (Wechselspannungswiderstandsmessung), das jeweils mit der Bewehrung des zu untersuchenden Bauteils sowie der beschriebenen Elektrode verbunden wird, kann der absolute Widerstand des Betons zwischen Betonoberfläche und Bewehrung ermittelt werden. Aus den gemessenen Wechselspannungswiderständen kann ein spezifischer Elektrolytwiderstand ermittelt werden [9].

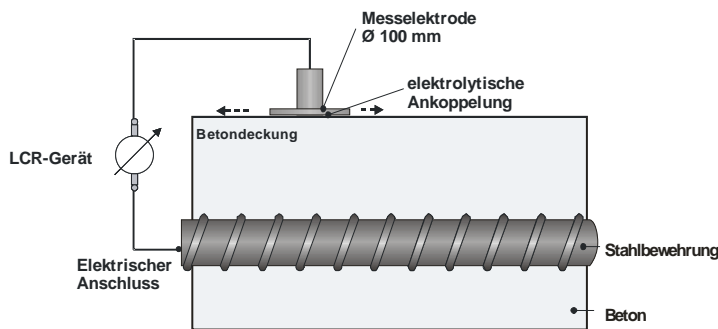


Bild 11: Funktionsprinzip der Elektrolytwiderstandsmessung (Ein-Elektroden-Messung)

Bild 12 zeigt die Ergebnisse einer Elektrolytwiderstandsmessung an einer Außenwand einer Tiefgarage. Es ist deutlich der Elektrolytwiderstandsgradient am Wandfuß infolge kapillar angesogenen Wassers zu erkennen.

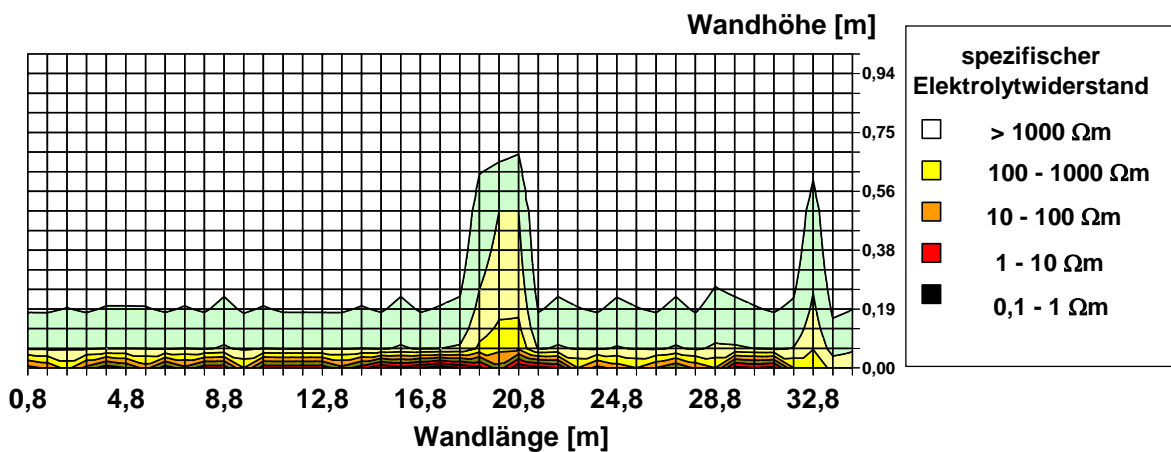


Bild 12: Elektrolytwiderstandsmessung eines Wandfußes [10]

Bestimmung von Chloridprofilen

Ein wesentlicher Bewertungsgesichtspunkt von chloridbelasteten Bauteilen ist die Chloridbelastung, die üblicherweise durch Erstellung und Bewertung von Chloridprofilen stattfindet. Dazu werden tiefengestaffelten Bohrmehlproben entnommen und diese Bohrmehlproben in Anlehnung an DAfStb-Heft 401 durch Säureaufschluss chemisch analysiert. Dabei ergibt sich der Gesamtchloridgehalt des Betons in M.-% bezogen auf die Betoneinwaage. Dieser muss anschließend durch sinnvolle Abschät-

zung der Rohdichte des Betons und dessen Zementgehaltes in einen Chloridgehalt bezogen auf den Zementgehalt (M.-%/z) umgerechnet werden.

Erstellung von Sondierungsöffnungen

Um den Schädigungsgrad durch bereits eingesetzte Bewehrungskorrosion abschätzen zu können, sind Sondierungsöffnungen an maßgebenden Stellen herzustellen. An diesen Sondierungsstellen kann neben dem Zustand der Bewehrung auch deren durch Korrosion verursachte Querschnittsminderung bestimmt werden. Ferner können dort Betondeckungsmessungen kalibriert und die Karbonatisierungstiefe bestimmt werden.

5. Zielgerichteter Einsatz der Methoden

Prinzip des abgestuften Vorgehens

Bei Parkdecks und Tiefgaragen hat sich folgendes abgestufte Untersuchungs- und Planungskonzept als zielführend und wirtschaftlich herausgestellt:

1. **Voruntersuchung:** hier erfolgt eine erste Inaugenscheinnahme des Parkdecks, welche mit der Erstellung von einigen Chloridprofilen einhergeht. Je nach visuell erkennbarem Schädigungsgrad werden stichprobenartig Betondeckungsmessungen durchgeführt, die Oberfläche akustisch auf Hohlstellen abgeklopft und bei starken Verfärbungen z.B. im Rissbereich lokal wenige Sondierungsöffnungen zur Bestimmung des Querschnittsverlustes an der Bewehrung erstellt.
2. **Vorplanung:** auf Grundlage dieser Voruntersuchungen werden mögliche Instandsetzungskonzepte erarbeitet und auch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bewertet. Diese Konzepte und deren Vor- und Nachteile sowie deren Wirtschaftlichkeit müssen dem Bauherren so vorgestellt werden, dass dieser sich ausreichend informiert sieht, um sich für ein Konzept zu entscheiden. In diesem Rahmen sind auch Ziele einer Instandsetzung durch den Planer mit dem Bauherren abzustimmen. Solche Ziele können z.B. sein: anvisierte Restnutzungsdauer, Reduzierung der Instandsetzungskosten durch regelmäßige Wartung oder Nutzungsanforderungen während der Instandsetzung. Auch müssen dem Bauherren evtl. Abweichungen von den Allgemein Anerkannten Regeln der Technik explizit erläutert und er muss auf mögliche daraus resultierende Risiken hingewiesen werden (z.B. Prinzip W-CI). Am Ende der Vorplanung stehen nun ein oder zwei bevorzugte Instandsetzungskonzepte, auf deren Grundlage dann eine wirtschaftliche Bauwerksdiagnose geplant werden kann.
3. **Bauwerksdiagnose:** während im Rahmen der Voruntersuchung der Schädigungsgrad an wenigen Stellen exemplarisch ermittelt wurde, wird in der eigentlichen Bauwerksdiagnose ange-

strebt, den Schädigungsgrad des gesamten Bauteils bzw. Bauwerks zu bestimmen. Dies ist für eine hinreichende Massensicherheit bei der Instandsetzungsmaßnahme unbedingt erforderlich.

Häufig untergliedert sich die Bauwerksdiagnose von chloridgeschädigten Bauteilen in folgende Einzelschritte:

- vollflächige visuelle Schadensaufnahme.
- vollflächige Potentialfeld- und Betondeckungsmessung.
- Erstellung von Sondierungsöffnungen an Übergangsbereichen von Korrosionsstellen, an Stellen zur Kalibrierung der Potentialfeldmessung oder an Stellen, an denen die Resttragfähigkeit der Konstruktion abgeschätzt werden soll.
- Erstellung von Chloridprofilen an nicht eindeutig zu interpretierenden Stellen.
- Ergänzende Untersuchungen wie z.B. Elektrolytwiderstandsmessungen.

4. **Instandsetzungsplanung:** auf Grundlage der Ergebnisse der Bauwerksdiagnose kann nun eine Instandsetzungsplanung mit hohem Detaillierungsgrad und Massensicherheit erstellt werden. Evtl. ist die Einschaltung eines Tragwerkplaners für die Bewertung der Resttragfähigkeit einzelner Bauteile oder bei der Planung von Abstützungsmaßnahmen erforderlich.

Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Zur Bewertung von Untersuchungsergebnissen wie Potentialfeldmessung, Chloridprofile und Betondeckungsmessungen ist eine große Sachkenntnis und Erfahrung erforderlich.

Es gibt aber auch Ansätze, die Zustandsbewertung im Rahmen eines Entscheidungsbaums zu systematisieren. Die dabei ermittelten Zustandsnoten sind in Tabelle 1 in Anlehnung an den Schädigungsprozess von Bild 2 zusammengestellt. Einen entsprechenden Entscheidungsbaum zeigt beispielhaft Bild 13: so macht es z.B. bei erkennbaren Abplatzungen der Betondeckung infolge chloridinduzierter Korrosion keinen Sinn noch Potentialfeld- und Betondeckungsmessungen durchzuführen oder Chloridprofile zu bestimmen.

Tabelle 1: Zustandsnoten zur Bewertung chloridbelasteter Bauteile in Anlehnung an [10] [11]

Zustandsnote	Zustandsbeschreibung
1	2
0	Bewehrung ist durch die Eigenschaften des Betons (Betondeckung, Alkalität, Beschichtung, Dichtheit, Zusammensetzung, Qualität, usw.) vor Korrosion geschützt
1	Einleitung der Schädigung: Ein oder mehrere Schutzmechanismen sind nicht aktiv; es liegt aber noch kein direkter Angriff vor. Chlorideintrag über Oberfläche und Karbonatisierung der Betondeckung beginnt.
2	Stahl ist angreifbar, da ein oder mehrere Schutzmechanismen gänzlich fehlen; Risse erreichen die Bewehrung; Betondeckung ist karbonatisiert und/oder Chloride in größerer Konzentration befinden sich in Nähe der Bewehrung (Punkt 1 in Bild 2)
3	Stahl korrodiert (Loch- und Muldenfraßkorrosion, Flächenkorrosion), wobei dieser Vorgang an der Betonoberfläche nicht zu sehen ist; die Korrosionsbereiche können durch Potentialfeldmessung unter Einbezug von äußeren Einflüssen lokalisiert werden; der Querschnittsverlust des Stahls ist gering
4	Es treten erste äußere Schadensbilder (Abplatzungen, Risse durch Volumenvergrößerung des Korrosionsproduktes) auf; signifikante Querschnittsverluste an der Bewehrung stellen sich ein (Punkt 3 in Bild 2)
5	Klare Schadensbilder an der Betonoberfläche sind erkennbar (Abplatzungen, Korrosionsverlaufsspuren an

Zustandsnote	Zustandsbeschreibung
1	2
	Rissen, Verfärbungen am Beton, Betongefüge löst sich auf usw.); deutliche Querschnittsverluste; Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit (Verkehrssicherheit)
6	Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauteils; erhebliche Querschnittsverluste der Bewehrung

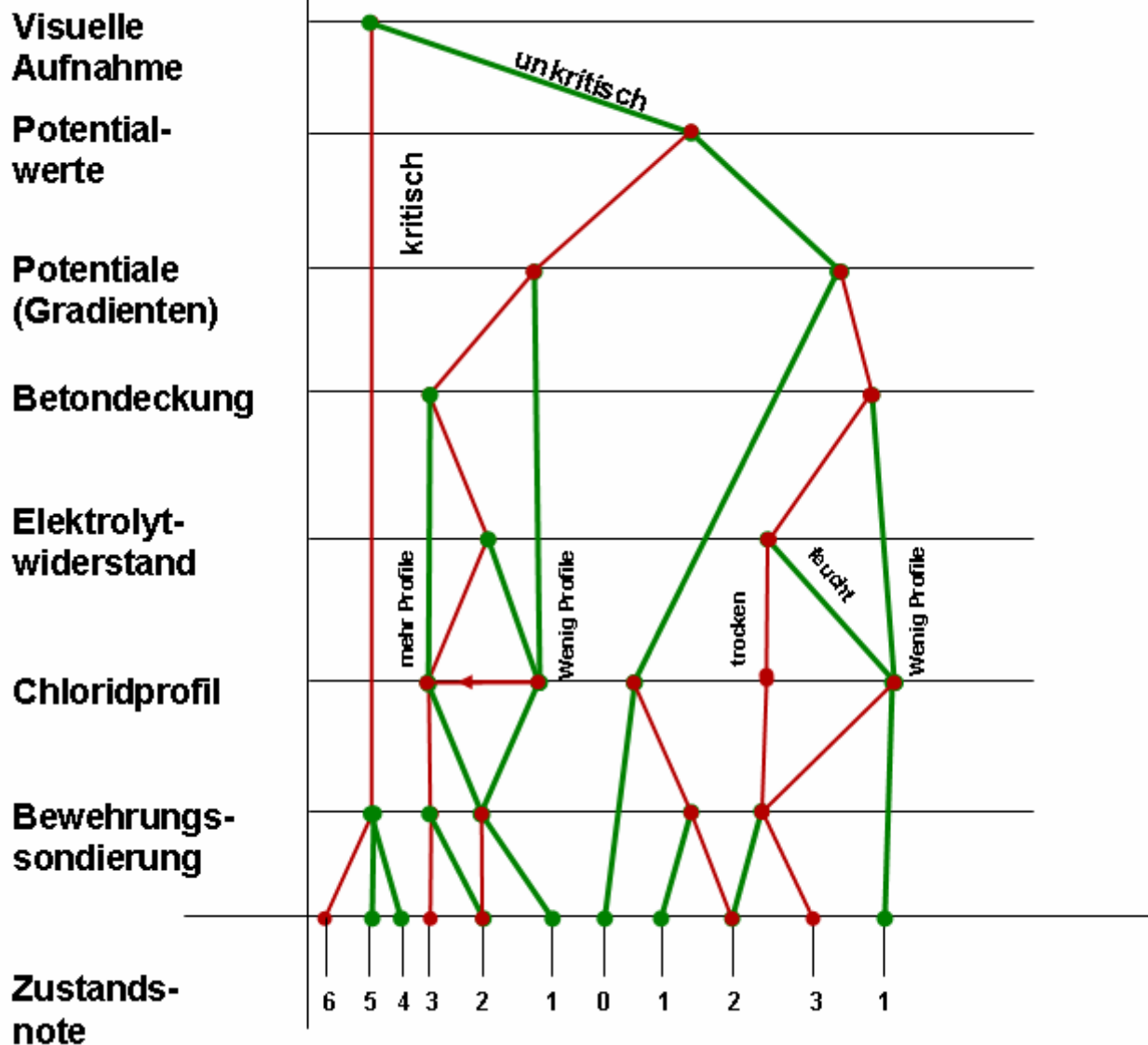


Bild 13: Entscheidungsbaum zur Bewertung von Ergebnisse der Bauwerksdiagnose [10] [11]

Mit Hilfe dieses Entscheidungsbaums kann der Zustand des Bauteils bzw. Bauwerks „mathematisch“ erfasst und bewertet werden. Außerdem können die einzelnen Prüfmethode zielgerichtet eingesetzt werden. Das Vorgehen entspricht damit im Prinzip der einheitlichen Schadensbewertung, die der Bundesverkehrsminister für z.B. Brücken in der RI-EBW-PRÜF vorgibt. Die Zustandsbewertung mit Hilfe eines solchen Entscheidungsbaums ermöglicht gerade bei vielen Bauwerken ein wirtschaftliches Instandsetzungsmanagement. Es bleibt aber zu betonen, dass ein sachkundiger und erfahrener Planer im Prinzip „unbewusst“ nichts anderes bei der Bauwerksdiagnose durchführt.

6. Ergänzende Untersuchungen bei Instandsetzungsprinzip 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“. Dass es sich bei der Austrocknung eines Betons durch eine Beschichtung um einen sehr langsamen Prozess handelt und dieses Instandsetzungsprinzip erhebliche Risiken birgt, ist in [12] erläutert.

Die Erfahrung zeigt, dass das Instandsetzungsprinzip W-Cl bei ablaufender Korrosion der Bewehrung nicht ohne erhebliche Risiken eingesetzt werden kann. Insofern ist die vollflächige Durchführung einer Potentialfeldmessung erforderlich. Bereiche, in denen Bewehrungskorrosion stattfindet, sind durch Entfernen des chloridbelasteten Betons auf jeden Fall herkömmlich Instand zu setzen. Dabei sind die Bereiche des Betonersatz großzügig zu wählen, da eine Korrosionsstelle die Nachbarbereiche kathodisch schützt.

Da eine Umverteilung der Chloride von der Betonoberfläche in das Bauteilinnere auch nach dem Beschichten der Betonoberfläche stattfinden wird, ist die Chloridverteilung durch Bestimmung einer größeren Zahl von Chloridprofilen und anschließender rechnerischen Abschätzung zu berücksichtigen.

Ferner sollte der Elektrolytwiderstand der Betonoberfläche bzw. der Betondeckung bestimmt werden, um auf die Feuchteverteilung des Bauteils schlüssen zu können. Da das Instandsetzungsprinzip W-Cl nicht funktionieren kann, wenn Wasser auf anderen Wegen als durch die beschichtete Betonoberfläche in das Bauteil gelangt, ist das Wissen um die Feuchteverteilung zur Bewertung der Eignung dieses Instandsetzungsprinzips sehr hilfreich. Das Prinzip W-Cl kann nicht bei z.B. WU-Bodenplatten im Grundwasser, Bauteilen, in denen aufgrund mangelnden Wärmeschutzes Tauwasserbildung stattfindet oder erdberührten Bauteilen (ohne Abdichtung an der Erdseite) funktionieren. Durch Bestimmung der Korrelation zwischen Elektrolytwiderstand und Feuchtegehalt anhand von z.B. kleinen Bohrkernen im Labor kann der gemessene Elektrolytwiderstand in einen entsprechenden Feuchtegehalt des Betons umgerechnet werden.

Da die Anwendung des Instandsetzungsprinzips W-Cl mit einem hohen technischen Risiko verbunden ist, schreibt die Instandsetzungsrichtlinie [2] auch einige schwerwiegende Vorgaben für dessen Anwendung vor. U.a. sollte das Verfahren nur angewandt werden, wenn durch Probeinstandsetzungen an Referenzflächen bzw. -bauteilen vor Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme die Auswir-

kung 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. Insofern ist das Anlegen einer Probefläche und das Messen der Korrosionsraten teil der Bauwerksdiagnose.

7. Ergänzende Untersuchungen bei Kathodischem Korrosionsschutz (KKS)

In letzten Jahren ist die Anzahl der Instandsetzungen nach dem Prinzip des „Kathodischen Korrosionsschutzes“ (KKS) bei Stahlbetonbauten erheblich angestiegen. Das Verfahren ist durch eine Norm (DIN EN 12696) geregelt und als Korrosionsschutzprinzip in der Instandsetzungsrichtlinie [2] erläutert. Die Anwendung von KKS entspricht somit den Allgemein Anerkannten Regeln der Technik.

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. Der Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass der chloridbelastete Beton nicht wie bei einer konventionellen Instandsetzung abgetragen werden muss.

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.

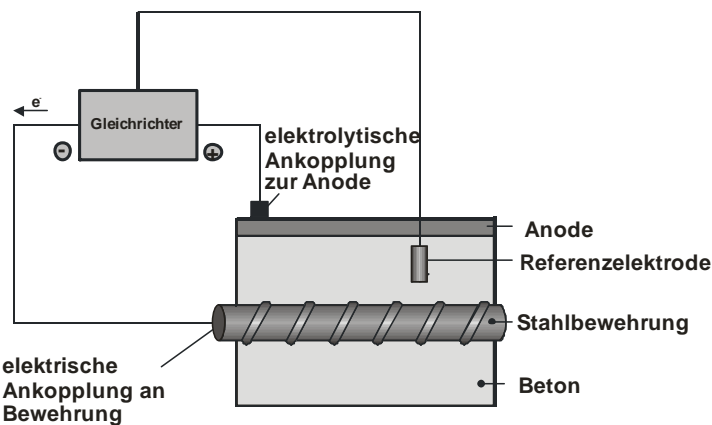


Bild 14: Funktionsprinzip des KKS als Fremdstromsystem für Stahlbetonbauwerke [13]

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 14. Nach Einschalten der Gleichspannung wird die Bewehrung kathodisch polarisiert und die Stahlkorrosion weitgehend unterbunden.

Im Rahmen der Bauwerksdiagnose muss nun untersucht werden, ob KKS technisch und wirtschaftlich anwendbar ist. Dazu sind folgende zusätzliche Untersuchungen durchzuführen:

- Messung der elektrischen Kontinuität der Bewehrung: für den kathodischen Schutz müssen alle zu schützenden Stahlbauteile elektrisch miteinander verbunden sein. Üblicherweise erfolgt diese elektrische Kontinuität durch Verrödeln der Bewehrungsstäbe. Sind dennoch einzelne Bewehrungselemente nicht miteinander verbunden, so kann dies im Rahmen der KKS-Instandsetzung durch nachträgliches Verschweißen der Bewehrungselemente erfolgen.
- Bewehrungsverteilung: zur Planung des KKS-Systems muss die Bewehrungsdichte der zu schützenden Bereiche bekannt sein. Fehlen die entsprechenden Bewehrungspläne, muss diese Information durch Bewehrungsortung und Erstellung stichprobenhafter Sondierungsöffnungen im Rahmen der Bauwerksdiagnose beschafft werden.
- Lage der zu schützenden Stähle: weiterhin muss für die Planung die Betonüberdeckung der Bewehrung bekannt sein. Bei zu geringen Betonüberdeckungen (kleiner 15 mm) sind nach DIN EN 12696 hinreichende Betondeckungen durch Reprofilierungsmörtel zu erstellen.
- Bestimmung der örtlichen Verteilung des Elektrolytwiderstandes und der Korrelation von Feuchtegehalt und Elektrolytwiderstand zur Auswahl eines geeigneten Mörtelsystems
- Überprüfung, ob Spannstahl (maßgeblich Spannstahl im direkten Verbund) eingebaut wurde
- Ermittlung möglicher Streustromeinflüsse durch z.B. U-Bahnen, Trambahnen.

Ferner sollten die Bereiche mit Hohllagen und Abplatzungen genau erfasst werden, ebenso sind die vorhandenen Querschnittsverluste der Bewehrung mit großer Aufmerksamkeit zu erfassen und zu bewerten, da im Gegensatz zur herkömmlichen Instandsetzung die Bewehrungslage bei der Instandsetzung nicht freigelegt wird und Zulagebewehrung im Vorfeld geplant werden muss.

8. Vorgehen bei chloridbelasteten Rissen

In den Bereich von Rissen können Chloride verständlicherweise wesentlich rascher ins Betoninnere eindringen als im ungerissenen Beton. So zeigen Auswertungen von Literaturergebnissen, dass die Zeitdauer bis zur Depassivierung der Bewehrung bei Rissbreiten von 0,4 mm deutlich unter einem Jahr liegen kann. Bei Rissbreiten von 0,2 mm erhöht sich diese Zeitdauer auf bis über 4 Jahre. Die Zeit bis zur Depassivierung nimmt zwar mit abnehmender Rissbreite zu, sie bleibt aber im Bereich der im Stahlbetonbau üblichen Betondeckungen immer wesentlich kleiner als die üblicherweise erwartete Lebensdauer von Betonteilen. Das bedeutet, dass mit Depassivierung der Bewehrung im Bereich von Rissen bei Chloridexposition gerechnet werden muss.

Dabei entsteht nach der Depassivierung der Bewehrung ein Makrokorrosionselement mit der Korrosionsstelle (Anode) üblicherweise im Rissbereich und der übrigen Bewehrung als Kathode außerhalb des Rissbereichs.

Ein Einfluss der Rissbreite auf die Korrosionsaktivität nach der Depassivierung konnte in umfangreichen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Dies bedeutet, dass im Rahmen der Bauwerksdiagnose nicht auf Grund der Rissbreite auf die zu erwartende Schädigung des Bewehrungsstahls geschlossen werden kann. Andere Untersuchungen zeigen, dass bei einer guten Betonqualität und einer hohen Betondeckung Korrosionsraten der Bewehrung geringer sind als bei einem schlechten Beton und geringen Betondeckungen [14].

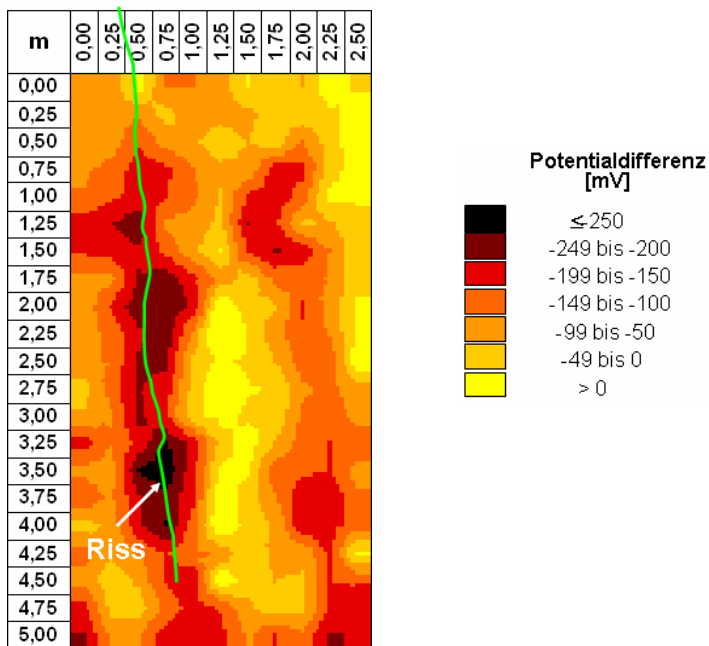


Bild 15: Potentialfeldmessung über einen Rissbereich mit tiefen Potentialwerten in Bereichen hoher Korrosionswahrscheinlichkeit [10]

Wie kann nun das Korrosionsrisiko der Bewehrung in Rissen ermittelt werden? Ein möglicher Weg geht über die Bestimmung der maximalen Chloridkonzentration in der Rissflanke und des daraus resultierenden Korrosionsrisikos. Die Erstellung von Chloridprofilen durch tiefengestaffelte Bohrmehlentnahme im Rissbereich hat aber den entscheidenden Nachteil, dass damit nicht die maximale Chloridkonzentration in der Rissflanke direkt ermittelt werden kann, da durch die Bohrmehlentnahme Bohrmehl direkt an der Rissflanke mit Bohrmehl aus dem inneren des Betons vermischt wird. Dadurch wird eine Art integrale Chloridkonzentration bestimmt. Aus diesem integralen Chloridgehalt kann die maximale Chloridkonzentration rechnerisch nur rückgerechnet werden, wenn die Chloridverteilung senkrecht zum Riss bekannt ist. Somit ist die Bestimmung der in der Rissflanke vorherrschenden maximalen Chloridkonzentration zur Bewertung des Korrosionsrisikos mit vielen Unwägbarkeiten verbunden und kann daher nicht empfohlen werden.

In der Praxis vielmehr bewährt hat sich eine Kombination aus Chloridbestimmung im Riss zur Überprüfung, ob überhaupt Chloride eingedrungen sind, und einer Potentialfeldmessung über dem Rissbereich. Die Risse, in die Chloride und Wasser eingedrungen sind und Korrosion hervorgerufen haben, können im Potentialbild gut erkannt werden (siehe Bild 15). Dabei sind die Vorgaben des Merkblattes [7] zu beachten. Durch eine stichprobenhafte Erstellung von Öffnungsstellen kann der Schädigungsgrad der Bewehrung durch Korrosion im Riss ermittelt werden.

Literatur

1. Raupach, M.: Vorgehensweise bei der Untersuchung von Parkhäusern. DGzFP Fachtagung Bauwerksdiagnose; Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen 23.-24. Februar 2006, Berlin

2. DAfStb.-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen, Rili-SIB. Beuth-Verlag, Berlin, 2001
3. Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. - In: CBI Research (1982), Nr. Fo 4:82.
4. Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt - Untersuchungen an Mörtелеlektroden in chloridhaltigen alkalischen Lösungen. Materials and Corrosion Volume 54 Issue 6, Pages 430 – 439
5. Harnisch, J.; Raupach, M.: Investigations Into the Time to Corrosion and Corrosion Initiating Chloride Contents for Steel in Concrete. Eurocorr 2010 13 to 17 September 2010 - Moscow/Russia
6. F. Fluge, Marine chlorides — a probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1, Third Workshop on “Service Life Design of Concrete Structures — From Theory to Standardisation”, DuraNet, Tromsø, 2001, pp. 63–83.
7. DGZfP, Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken (B3), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (2008)
8. Taffe, A.; Stoppel, M.; Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) – Übersicht der Verfahren. In: „Betoninstandsetzung im Ingenieur- und Wohnungsbau“ 04.03.2010, Filderstadt
9. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring metallic Corrosion, Materials and Structures, Vol. 33, December 200, pp 603 - 611
10. Steck, M.: Zuverlässigkeit von Potentialfeldmessungen – Interpretation unter Berücksichtigung begleitender Bauwerksuntersuchungen. Diplomarbeit erstellt an der Hochschule München; Juli 2006
11. Lay, S.: Prototype of Condition Assessment Protocol – Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, Project LIFECON, cbm – Technische Universität München, 2003.
12. Dauberschmidt, C.: Chloridbelasteter Beton – immer ein Entsorgungsfall? Regionaltagung des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins am 23. Februar 2010, München.
13. Dauberschmidt, C.; Sodeikat, Ch.; Vestner, S.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit Walzträgern nach dem Prinzip des Kathodischen Korrosionsschutzes. Beton- und Stahlbetonbau 11/2009
14. Schießl, P.; Raupach, M.: Investigation of the Mechanisms of Corrosion Affecting Reinforcing Steel in the Crack Zone. Athens: Technical University, 1992. - In: Commemorative publication to the 60th Birthday of Prof. Tassios, Vol. I, S. 241-254