

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Raupach, Michael; Bruns, Michael

Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken im Wasserbau - Anwendungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele –

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102073>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

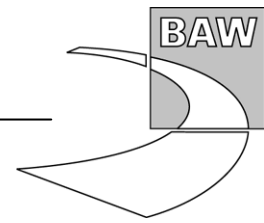
Raupach, Michael; Bruns, Michael (2009): Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken im Wasserbau - Anwendungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele –. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 74-83.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Prof. Dr.-Ing. M. Raupach, RWTH Aachen

Dipl.-Ing. Michael Bruns, Ingenieurbüro Raupach Bruns Wolff, Aachen

Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken im Wasserbau
- Anwendungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele -

Zusammenfassung

Der Kathodische Korrosionsschutz von Stahlbetonbauwerken wird seit vielen Jahren weltweit auch im Bereich des Wasserbaus angewendet, insbesondere bei Bauteilen im chloridhaltigen Meerwasser. In den ständig unter Wasser liegenden Bereichen werden i.d.R. Opferanoden eingesetzt, wobei die gute elektrische Leitfähigkeit des Meerwassers für die Stromübertragung von Anode zur Bewehrung genutzt wird. In den darüber liegenden Bereichen werden i.d.R. Fremdstromanoden eingesetzt, z.B. aus aktiviertem Titan mit Mörtel- oder Betoneinbettung.

Im Rahmen einer Probeinstandsetzung an einem Pfeiler des Eidersperrwerks soll nun erstmals das Konzept einer sogenannten KKS-Barriere zur Vermeidung der Bildung eines Makrokorrosionselementes zwischen der passiven Bewehrung in instandgesetzten Bereichen und depassivierter Bewehrung in nicht instandgesetzten Bereichen eingesetzt werden. Mittels externer kathodischer Polarisation durch ein lokal installiertes KKS-System wird hierbei das Ziel verfolgt die passive Bewehrung im Übergang zwischen instandgesetztem und nicht instandgesetztem Bereich soweit kathodisch zu polarisieren, dass sie nicht mehr als Kathode für die Makroelementkorrosion zur Verfügung steht.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird das vorhandene Schadensbild, das Konzept der geplanten Instandsetzungsmaßnahmen sowie das Prinzip der KKS Barriere vorgestellt.

1 Bauwerk

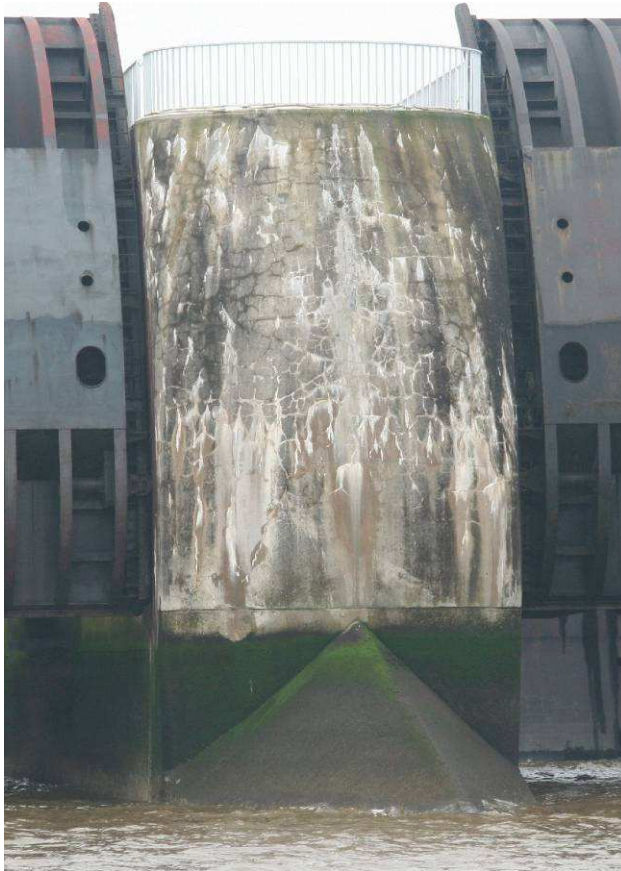
Das Sielbauwerk des Eidersperrwerkes wurde 1972 in Betrieb genommen. Es besitzt 5 Öffnungen mit jeweils 40 m lichter Durchflussweite. Diese Öffnungen werden durch Pfeilerbauwerke begrenzt und durch Spannbetonträger überbrückt. Diese Spannbetonträger mit elliptischen Querschnitt (Wehrträger) nehmen einerseits über Drehgelenke die Kräfte aus den Sielverschlüssen auf und leiten sie in die Pfeilerbauwerke ab; andererseits sind sie im Inneren als Straßentunnel ausgebaut. Die Segmenttorantriebe befinden sich in den Pfeilerbauwerken. Bild 1 zeigt eine Ansicht des Sielbauwerks.



Bild 1: Sielbauwerk des Eidersperrwerks (von der Binnenseite)

2 Schadensbild

Insbesondere im Bereich der jeweils stirnseitig vorhandenen Korbbögen der Sielpfeiler des Eidersperrwerks oberhalb der Eisabweiser sind teilweise ausgeprägte Netzrisse mit Aussinterungen vorhanden (siehe Bilder 2 und 3). In der Vergangenheit durchgeführte Kernbohrungen in diesem Bereich zeigten, dass hier auch parallel zur Oberfläche verlaufende Schalenrisse bei einer Betondeckung von teilweise über 20 cm vorhanden sind. Am stärksten ausgeprägt ist diese Rissbildung auf der Binnenseite des Pfeilers 1 (siehe Bild 2). Aus den Bauwerksakten wurde ersichtlich, dass im Bereich der Korbbögen ein Beton B 450 mit Portlandzement PZ 375 verwendet wurde, im Bereich der Pfeilersockel und Eisabweiser unterhalb NN +2,00 m wurde dagegen ein B 300 mit Hochofenzement HOZ 275 verwendet. Im Bereich des B 300 unterhalb NN +2,00 m sind nur sehr vereinzelt Risse vorhanden, ausgeprägte Netzrisse wie im B 450 liegen hier jedoch nicht vor.

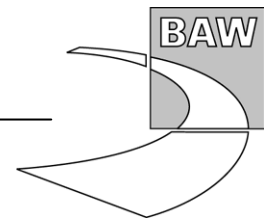


Bilder 2 und 3: Netzrisse am Korbbogen des Pfeilers 1 (Binnenseite) oberhalb NN + 2,00 m im Bereich des PZ-Betons. links: Übersicht, rechts: Detail

Im Rahmen früherer Untersuchungen wurden die folgenden Punkte als wahrscheinliche Ursachen für die vorhandenen Netz- und Schalenrisse im Bereich der Korbbögen aufgeführt:

- Spannungen infolge Temperaturunterschieden zwischen Kern- und Randbeton bei der Hydratation infolge der Verwendung eines Portlandzementes mit hoher Wärmeentwicklung
- In einigen Bereichen mangelhafte Nachbehandlung
- AKR muss in Betracht gezogen werden, da in der Kornfraktion 0/3 mm alkaliempfindliche Bestandteile enthalten sind und der Portlandzement bei einem Zementgehalt von 375 kg/m^3 genügend Alkalien liefert. Untersuchungen der BAW zeigten das AKR-Reaktionspotential auf.
- Grobes Bewehrungsraster und große Stabdurchmesser der oberflächennahen Bewehrung

Untersuchungen der Chloridgehalte des Betons in Abhängigkeit der Betondeckung ergaben sowohl im Bereich der Pfeilerstirnseiten (Korbbogen, Eisabweiser) wie auch im Bereich der Seitenflächen teilweise deutlich erhöhte Chloridgehalte. Im HOZ-Beton in der Wasserwechselzone wurden an beinahe allen beprobten Stellen Chloridgehalte größer 0,5 M.-% bez. auf den Zementgehalt selbst bei einer Betondeckung von 6-8 cm ermittelt. Selbst bei der planmäßig und, wie durchgeführte Betondeckungsmessungen zeigten, größtenteils auch vorhandenen Betondeckung von 5 cm ist eine großflächige Depassivierung der Bewehrung in diesem Bereich demnach wahrscheinlich. Auch im PZ-Beton der Korbbögen oberhalb NN + 2,00 m wur-



den erhöhte Chloridgehalte festgestellt. Wie sich bei Bohrkernuntersuchungen und anhand stellenweise vorhandener Abplatzungen zeigte ist auch hier insbesondere in den gerissenen Bereichen von Bewehrungskorrosion auszugehen. Im Gegensatz dazu sind im Bereich der Pfeilersockel und Eisabweiser noch keine nennenswerten äußerlich erkennbaren Schäden infolge Bewehrungskorrosion, wie z.B. Betonabplatzungen erkennbar.

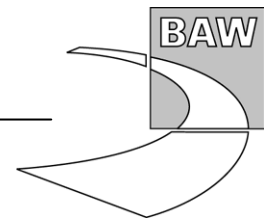
3 Vorgesehene Instandsetzungsmaßnahmen

Zunächst soll im Rahmen einer Probeinstandsetzung der am stärksten von der Rissbildung betroffene Korbbogenbereich des Pfeilers 1 auf der Binnenseite instandgesetzt werden. Im Rahmen dieser Maßnahmen soll der vorhandene Beton im Bereich des binnenseitigen Korb Bogens bis auf eine Tiefe von ca. 30 cm mittels Höchstdruckwasserstrahlens abgetragen und durch eine neue Betonschale ersetzt werden. Schadhafte Bewehrung wird vor der erneuten Betonage ersetzt sowie Zusatzbewehrung eingebaut. Der Betonabtrag sowie die Betonage der Vorsatzschale erfolgt dabei nur im Bereich des Korb Bogens oberhalb etwa NN +2,00 m bis zum Rand der Schleifdichtungsschienen der Segmenttore. Weiterhin ist vorgesehen die Pfeilerdecke im Korbbogenbereich teilweise abzutragen und zu ersetzen. Im Bereich des Eisabweisers und des Pfeilersockels sollen keine Maßnahmen durchgeführt werden, da hier bislang keine Anzeichen für eine Schädigung vorliegen. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Eigenkorrosionsrate im HOZ-Beton aufgrund des ständig hohen Wassergehaltes des Betons nahe der Sättigung gering ist. Das Risiko eines Schadens größeren Ausmaßes durch diese Eigenkorrosion wird nach derzeitigem Kenntnisstand als so gering eingeschätzt, dass eine traditionelle Instandsetzung des HOZ-Betons bei den vor Ort vorhandenen schwierigen Arbeitsbedingungen derzeit als nicht gerechtfertigt erscheint.

Unter der Annahme, dass sich die Bewehrung im Bereich der Eisabweiser und Pfeilersockel infolge der hohen Chloridgehalte dennoch zumindest teilweise in depassiviertem Zustand befindet, besteht bei dieser Vorgehensweise der Instandsetzung jedoch prinzipiell die Gefahr, dass im HOZ-Beton unterhalb NN + 2,00 m stattfindende Bewehrungskorrosion nach der Instandsetzung durch Makroelementbildung zwischen der Bewehrung nun passiven Bewehrung in der neuen Vorsatzschale des Korb Bogens und der aktiven Bewehrung im HOZ-Beton unterhalb NN + 2,00 m beschleunigt wird.

Um diese beschleunigte Korrosion infolge Makroelementkorrosion zu vermeiden wurde ein neues Konzept verfolgt, bei dem das Korrosionspotential der passiven Bewehrung der Betonvorsatzschale im Randbereich zum HOZ-Beton durch kathodische Polarisierung mittels Fremdstromanoden soweit abgesenkt wird, dass die passive Bewehrung im Bereich der Vorsatzschale nicht mehr als Kathode im Makroelement zur Verfügung steht.

Der theoretische Hintergrund, das Funktionsprinzip und die geplante Umsetzung dieser im Folgenden als KKS-Barriere bezeichneten Maßnahme werden nachfolgend erläutert.



4 Makroelementproblematik bei der Instandsetzung der Pfeilerschäfte im Bereich der Korbbögen

4.1 Prinzip der Makroelementkorrosion

Bei Bauwerken, die der Einwirkung von Meerwasser ausgesetzt sind, wie dem Eidersperrwerk, wird die Korrosion zumeist durch von Außen eindringende Chloride verursacht. Bei Überschreitung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehaltes an der Stahloberfläche wird die Passivschicht instabil. Die anodische Teilreaktion der Korrosion, die Eisenauflösung, wird dadurch möglich. Gleichzeitig sinkt das Stahl-Beton Potential im depassivierten Bereich im Vergleich zu noch passiven Nachbarbereichen ab. Diese Potentialdifferenz stellt die treibende Kraft der Makroelementkorrosion dar.

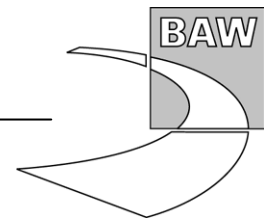
4.2 Makroelementproblematik bei der Instandsetzung des Eidersperrwerkes

Wie festgestellt wurde liegen im HOZ-Beton im Bereich des Eisabweisers bereits so hohe Chloridgehalte bis in Höhe der Bewehrung vor, dass davon auszugehen ist, dass die Bewehrung hier bereits zumindest bereichsweise depassiviert und damit korrosionsbereit ist. Auch im Bereich der Risse im PZ-Beton der Korbbögen ist Bewehrungskorrosion wahrscheinlich. Die Potentialdifferenzen zwischen diesen Bereichen sind daher eventuell derzeit verhältnismäßig gering, so dass zwischen diesen Bereichen keine ausgeprägte Makroelementkorrosion stattfindet. Wird der Beton wie geplant nur im Bereich des Korbbogens ersetzt, wird hierdurch ein großer Bereich mit passiven Bewehrungsflächen und entsprechend positiveren Potentialwerten erzeugt. Die daraus resultierenden größeren Potentialdifferenzen zwischen der vollständig passiven Bewehrung in der neuen Betonschale und der bereichsweise aktiven Bewehrung im unteren Pfeiler- und im Eisabweiserbereich könnten zur Ausbildung eines starken Makroelementes mit im Vergleich zum Ist-Zustand deutlich erhöhten Abtragsraten an der Bewehrung im nicht instandgesetzten Bereich unterhalb NN +2,00 m führen.

5 Makroelementunterdrückung durch lokale kathodische Polarisierung (KKS-Barriere)

Grundsätzlich findet der Ladungstransport im Makrokorrosionselement entlang des Potentialgradienten statt, das heißt es findet ein Elektronentransport im Stahl von Bereichen negativeren Bewehrungspotentials in Bereiche positiveren Bewehrungspotentials statt. Gleichzeitig migrieren Anionen (z.B. OH^-) im Beton von Bereichen positiveren Bewehrungspotentials in Bereiche negativeren Bewehrungspotentials und Kationen (z.B. Fe^{2+}) in entgegengesetzte Richtung. Dies bedeutet, je kleiner der Potentialgradient zwischen aktiver und passiver Bewehrung ist, desto geringer ist der Stromfluss und damit die Korrosionsgeschwindigkeit im Makroelement bzw. die Eisenauflösung in den depassivierten Bereichen.

Wird also das Potential der passiven Bewehrung in einem Streifen am unteren Rand der neuen Betonschale auf das gleiche oder ein negativeres Potential polarisiert wie das der aktiven Bewehrung im angrenzenden HOZ-Beton, so ist die Entstehung eines Makrokorrosionselementes zwischen diesen Bereichen nicht möglich, da der Potentialgradient fehlt bzw. in die entgegengesetzte Richtung zeigt. In Bild 4 ist zu Verdeutlichung eine schematische Darstel-



lung des Verlaufs des Potentials an der Stahloberfläche für den Fall der Makroelementkorrosion sowie für deren Unterdrückung durch die Installation einer KKS-Barriere dargestellt.

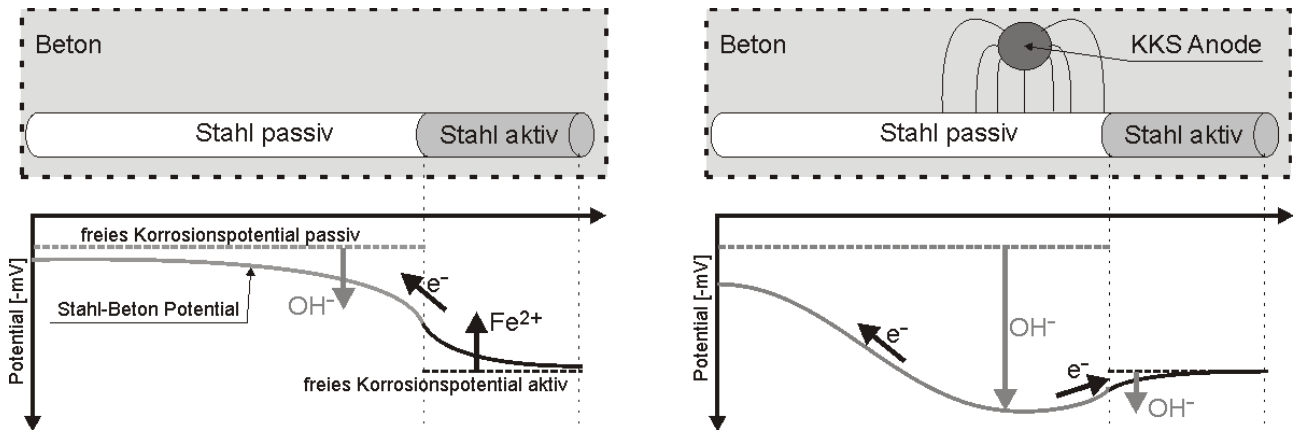


Bild 4: Schematische Darstellung des Potentialverlaufs bei freier Makroelementkorrosion (links) und im Fall einer installierten KKS-Barriere (rechts)

6 Numerische Simulation

Um die Idee der KKS-Barriere weiter zu veranschaulichen und um ihre Machbarkeit für die Randbedingungen des Binnenpfeilers 1 des Eidersperrwerks abzuschätzen, wurden numerische Simulationsrechnungen an einem vereinfachten Modell mittels der Methode der Finiten Elemente zur Abschätzung der Strom- und Potentialverteilung mit und ohne KKS-Barriere durchgeführt [1]. In Anlehnung an die beim Eidersperrwerk zu erwartenden Bedingungen hinsichtlich Bauteil- und Bewehrungsgeometrie wurde die in Bild 5 dargestellte Geometrie verwendet, bei der Bewehrungsdurchmesser und Stababstände entsprechend der vorhandenen Pläne und der geplanten Instandsetzung angenommen wurden.

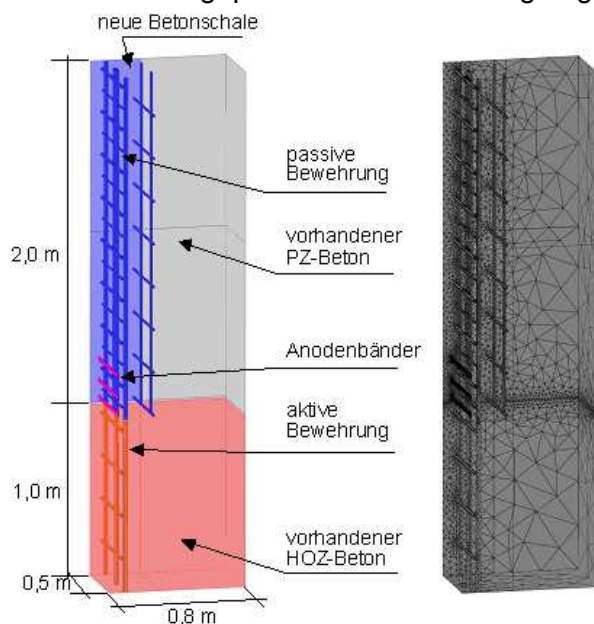


Bild 5: Für die numerischen Simulationsrechnungen verwendete Geometrie sowie das verwendete Netz

Als Eingangsparameter für die numerische Simulation werden die spezifischen Elektrolytwiderstände der Betone sowie die Polarisations-eigenschaften der aktiven und passiven Bewehrung und des Anodenmaterials benötigt. Da für keinen dieser Parameter Daten vom Objekt vorliegen, mussten hierfür Annahmen getroffen werden. Für die Polarisations-eigenschaften der aktiven und passiven Bewehrung wurden die in Bild 6 dargestellten Stromdichte-Potentialbeziehungen angenommen. Die gepunktet dargestellten Daten stammen aus Laborversuchen eines Forschungsprojektes des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen. Sie wurden im Fall der aktiven Bewehrung an einem Prüfkörper aus CEM I – Beton bestimmt, dem bei der Herstellung 4,0 M.-% Chlorid zugegeben wurde. Für den Prüfkörper, an dem die Kurve für die passive Bewehrung ermittelt wurde, wurde der gleiche Beton, jedoch ohne Chloridzugabe verwendet. Im Vergleich zur Labormessung wurde die Kurve der aktiven Bewehrung, die für die Simulation verwendet wurde, zu einem negativeren freien Korrosionspotential und einer höheren Korrosionsstromdichte verschoben, um eine noch höhere Korrosionsaktivität des Stahls nachzustellen.

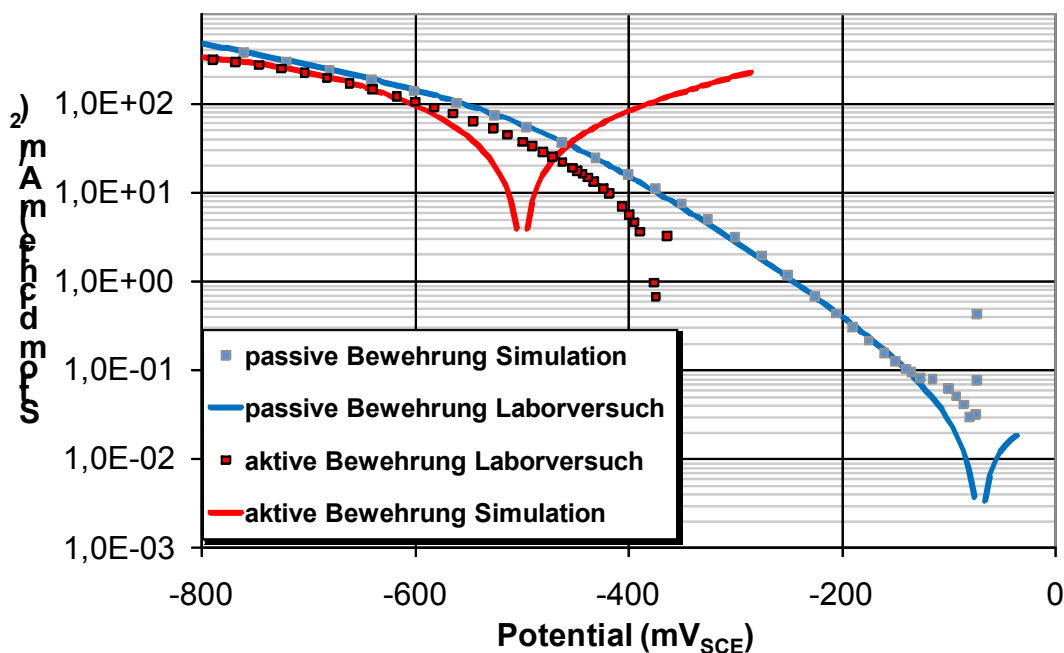


Bild 6: Für die Simulationsrechnungen verwendete Polarisations-eigenschaften der Bewehrung

Für den vorhandenen PZ-Beton sowie für die neue Betonvorsatzschale wurde ein spezifischer Elektrolytwiderstand von 200 Ω m und für den vorhandenen HOZ-Beton ein spezifischer Elektrolytwiderstand von 250 Ω m angenommen.

In Bild 7 sind als Ergebnis der Simulationsrechnungen die Potentialverteilungen im Beton und auf der Bewehrungsoberfläche einerseits für die freie Makroelementkorrosion (links) und andererseits bei eingeschaltetem Schutzstrom der KKS-Barriere (drei Anodenbänder mit einem Gesamtstrom von 19,5 mA pro Meter) (rechts) dargestellt. Deutlich ist darin zu erkennen, wie die Potentialdifferenz im Übergangsbereich zwischen der aktiven und passiven Bewehrung durch das Einschalten der KKS Barriere ausgeglichen wird.

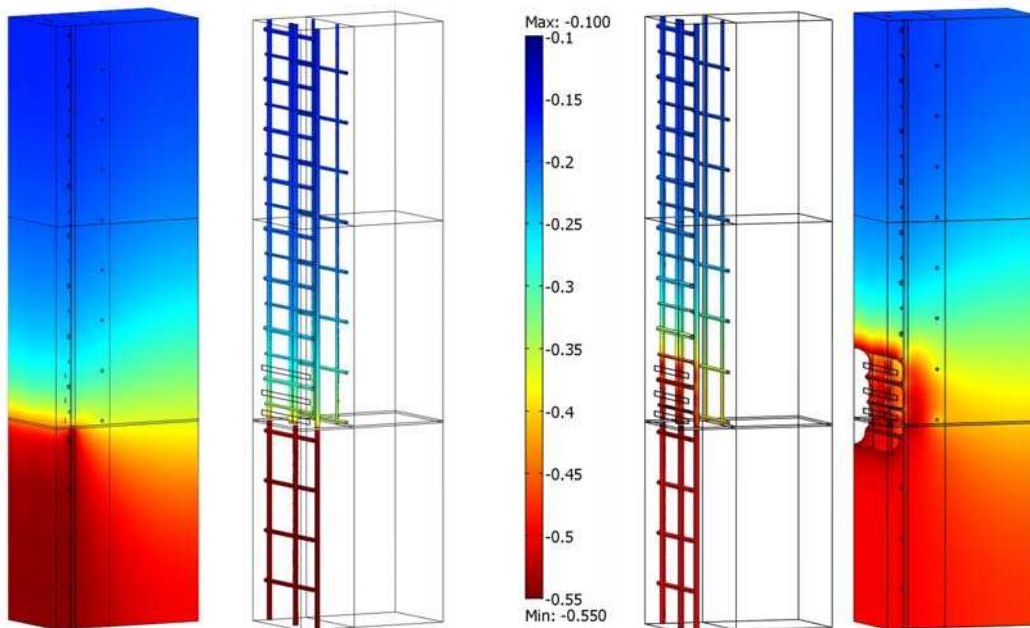


Bild 7: Potentialverteilungen für die freie Makroelementkorrosion (links) und bei eingeschaltetem Schutzstrom der KKS-Barriere (19,5 mA pro Meter) (rechts). Potentialwerte in V_{SCE}

Exemplarisch zeigt Bild 8 den Verlauf des Potentials auf der Rückseite des mittleren Vertikalstabes im Bereich des HOZ Betons (aktive Bewehrung). Das freie Korrosionspotential der aktiven Bewehrung im HOZ-Beton wurde für die Simulation zu -500 mV_{SCE} angenommen. Je stärker die Potentialverschiebung in positive Richtung ausfällt, desto stärker korrodiert der Stab an der jeweiligen Stelle. Bei Potentialen negativer -500 mV ist der Stab an der jeweiligen Stelle kathodisch polarisiert, was bedeutet, dass eine Eisenauflösung nicht stattfindet.

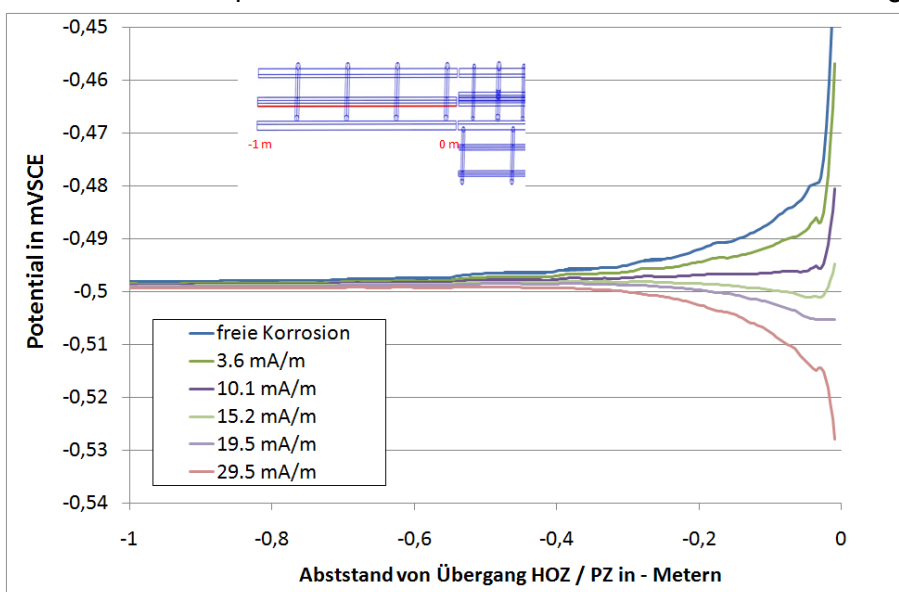
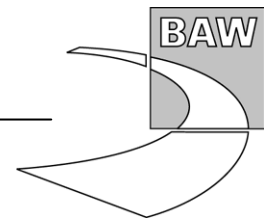


Bild 8: Potentialverlauf auf der Rückseite des mittleren Vertikalstabes im HOZ bei ausgeschalteter KKS Barriere und bei verschiedenen Schutzströmen bezogen auf die Länge der KKS Barriere



Wie in Bild 8 zu erkennen ist findet bei freier Korrosion und den Annahmen des Modells die stärkste Korrosion im Bereich der ersten 20 bis 30 cm statt. Bei einer längenbezogenen Stromdichte der KKS Barriere von 19,5 mA/m wird in den Simulationsrechnungen die Makroelementkorrosion in diesem Bereich dagegen vollständig unterdrückt. In tiefer liegenden Bereichen liegt die anodische Polarisierung der Stahloberfläche bei diesem Schutzstrom mit maximal 1,5 mV bei vernachlässigbaren Werten, was praktisch gesehen einem vollständigen Ausschalten der Wirkung der Makroelementkorrosion gleich kommt.

Aufgrund der zahlreichen Vereinfachungen und Annahmen, die der Simulation hier zugrunde liegen, lassen sich diese Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die praktische Anwendung übertragen. Insbesondere die Polarisierungseigenschaften der Bewehrung unterliegen in der Praxis großen Streuungen. Eine geringe Sauerstoffverfügbarkeit infolge sehr nassen Betons kann beispielsweise eine deutlich leichtere kathodische Polarisierbarkeit der Bewehrung bewirken. Die Ergebnisse zeigen jedoch die prinzipielle Machbarkeit einer KKS-Barriere auf.

7 Geplante Umsetzung

Die Komponenten der KKS-Barriere unterscheiden sich prinzipiell nicht von denen einer herkömmlichen KKS-Installation für Stahl in Beton nach DIN EN 12696 [2]. Der Unterschied besteht im Wesentlichen darin, dass hier die Anodeninstallation nur in einem lokalen Streifen von 0,25 m Höhe knapp oberhalb des HOZ-Betons im Bereich der neuen Betonschale erfolgt. Die wesentlichen Bestandteile der KKS Barriere sind entsprechend: das Anodensystem, die Anoden und Bewehrungsanschlüsse sowie ihre Zuleitungen, Bezugselektroden sowie ein Schutzstromgerät (Gleichrichter) und eine Monitoringanlage.

Als Anodensystem werden beim Eidersperrwerks sogenannte MMO-Titanbandanoden zum Einsatz kommen, wie sie oftmals auch für den herkömmlichen KKS bei Stahlbeton eingesetzt werden. Es ist geplant drei dieser Anodenbänder in einem vertikalen Abstand von ca. 12 cm zueinander umlaufend um den Korbbogen in die Betondeckung an der Unterseite der neuen Vorsatzschale einzubetten. Bild 9 zeigt die geplante Anodenanordnung der KKS Barriere.

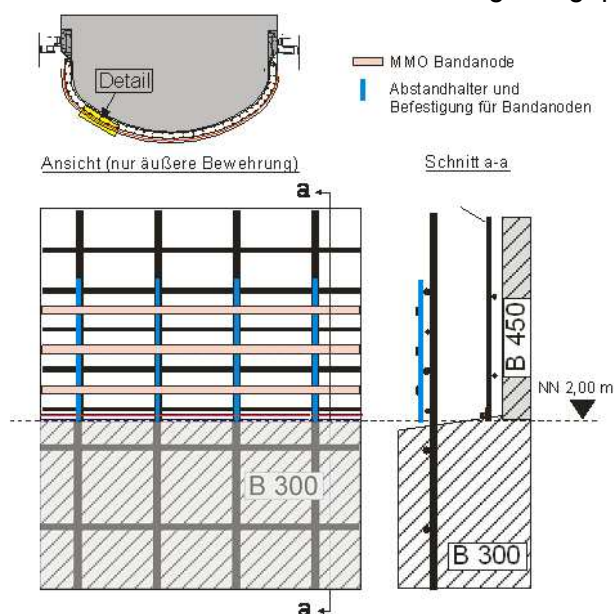
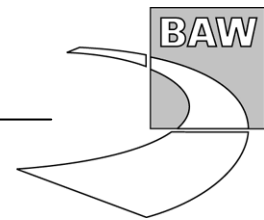


Bild 9: Schematische Darstellung der Anodenanordnung der KKS Barriere beim Korbbogen des Pfeilers 1 des Eidersperrwerks



8 Ausblick

Die hier beschriebene Probeinstandsetzung wurde durch den Bauherrn (WSA Tönning) öffentlich ausgeschrieben und ist bereits vergeben worden. Mit dem Beginn der Arbeiten ist im Frühjahr 2010 zu rechnen. Die Installation der KKS Barriere selbst wird dabei nur einen Bruchteil der Gesamtkosten der Probeinstandsetzung ausmachen.

In Abhängigkeit der Ergebnisse der Probeinstandsetzung ist geplant, dieses Instandsetzungskonzept in den nächsten Jahren auch auf die Pfeiler und Pfeilerbereiche zu übertragen.

9 Literatur

1. Bruns, M. ; Raupach, M.: *Protection of the Rear Reinforcement of RC-Structures by CP - Results of Numerical Simulations*. Edingburgh : European Federation of Corrosion, 2008. - In: EUROCORR 2008. The European Corrosion Congress, Managing Corrosion for Sustainability, Edingburgh, 7-11 September 2008, 14 Seiten
2. DIN EN 12696, 2000-06: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton; Deutsche Fassung EN 12696:2000