

Abteilung I

Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (für gewerbliche und Freizeitschifffahrt)

zu Thema 5:

Thema des ersten deutschen Berichts

Untersuchung und Instandsetzung des Eidersperrwerks

Berichtersteller:

Dipl.-Ing. Andreas Westendarp, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

An den fünf in Spannbetonbauweise errichteten Wehrträgern des 1973 fertiggestellten Eidersperrwerkes müssen grundlegende Instandsetzungsarbeiten durchgeführt werden. Wie umfangreiche Untersuchungen gezeigt haben, gefährden neben unzureichend verpreßten Spanngliedern insbesondere Chloride sowie Fehlstellen und Risse im Beton die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes.

Zur Auffindung unverpreßter Spanngliedabschnitte sind im Jahr 1984 zunächst große Bauwerksbereiche mit Hilfe eines Linearbeschleunigers durchstrahlt worden. Anschließend wurde ein Teil der als möglicherweise unverpreßt identifizierten Spannglieder angebohrt und mittels Endoskop auf den tatsächlichen Korrosions- und Verpreßzustand hin untersucht. Mit Einpreßmängeln behaftete Spannglieder wurden, soweit zugänglich, in den letzten Jahren nach und nach im sogenannten Vakuumverfahren nachinjiziert. Die angewandten Verfahren zur Auffindung und Nachverpressung einpreßmangelbehafteter Spannglieder waren zwar aufwendig, aber nachweislich durchaus effektiv. Zur Beurteilung des Zustandes von Beton und außenflächennaher Betonstahlbewehrung an Wehrträger I wurden ebenfalls intensive Bauwerksuntersuchungen durchgeführt. Dabei fand u.a. das Potentialmeßverfahren Verwendung. Die verschiedenen Untersuchungen zeigten, daß der Korrosionsschutz der Bewehrung an der Wehrträgerunterseite durch hohe Chloridanreicherungen im Beton, aber auch durch Betonabplatzungen infolge beim Betonieren in der Schalung verbliebener, nun nach und nach korrodierender Stahlabfälle gefährdet war. Im Jahr 1991 wurde deshalb in diesem Bereich der anstehenden Beton B45 in einer Stärke von etwa 3 cm mittels Hochdruckwasserstrahlen abgetragen und durch einen kunststoffvergüteten Spritzmörtel (SPCC) ersetzt. Abschließend ist auf der gesamten Wehrträgeraußenfläche ein rißüberbrückendes Oberflächenschutzsystem auf Polymer/Zement-Basis appliziert worden. Die eingesetzten Instandsetzungsmaterialien wurden sowohl im Vorfeld der Baumaßnahme wie auch baubegleitend intensiven Laboruntersuchungen unterworfen. Bei hinreichender Bewährung der durchgeführten Instandsetzungsmaßnahme sollen die verbleibenden vier Wehrträger ab 1995 auf vergleichbare Weise instandgesetzt werden.

Die Ursachen für den überwiegenden Teil der zu behebenden Schäden sind bei Unzulänglichkeiten während der Bauausführung zu suchen. Allerdings muß allen an der Baumaßnahme Beteiligten zugute gehalten werden, daß sich die heute wie selbstverständlich vorhandene Sensibilität gegenüber Einflüssen, die den Korrosionsschutz der Bewehrung gefährden könnten, erst im Verlaufe der letzten etwa 20 Jahre ausgebildet hat.

Inhalt

0 Einleitung

1 Bauwerk

2 Instandsetzung der Spannglieder

3 Betoninstandsetzung an Wehrträger I

Schrifttum

0 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten ist bei vielen Bauwerken die Grenze der Leistungsfähigkeit des Verbundbaustoffes Stahlbeton durch immer höhere Anforderungen bei Planung und Ausführung erreicht und z.T. sogar überschritten worden. Planungsfehler, unzureichend erfaßte oder gegenüber dem Planungsstadium veränderte Beanspruchungen sowie immer filigranere Bauweisen mit hohen statischen Ausnutzungsgraden bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Ausführungsqualität können die Dauerhaftigkeit vieler Bauwerke soweit einschränken, daß oftmals bereits wenige Jahre nach der Fertigstellung grundlegende Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich werden. Massivbauwerke im Meerwasserbereich, die durch Chloridbeaufschlagung, Wellenschlag und verschärften Frostangriff zusätzliche Belastungen erfahren, sind in ihrer Dauerhaftigkeit naturgemäß besonders gefährdet.

Am Beispiel der 1967 bis 1973 in Spannbetonbauweise erstellten Wehrträgern des Eidersperrwerkes sollen spezifische Probleme bei der Untersuchung und Instandsetzung von Meerwasserbauwerken dargestellt werden.

1 Bauwerk

1.1 Entstehungsgeschichte

Nach den verheerenden Sturmflutkatastrophen 1953 in den Niederlanden und 1962 in Deutschland wurde der Ausbau des Hochwasserschutzes an der deutschen Nordseeküste verstärkt vorangetrieben. An der Westküste Schleswig-Holsteins sollte im Zuge dieser Maßnahmen der wichtigste Vorfluter des Landes, die Eider, mündungsnah abgedämmt werden (Bild 1).

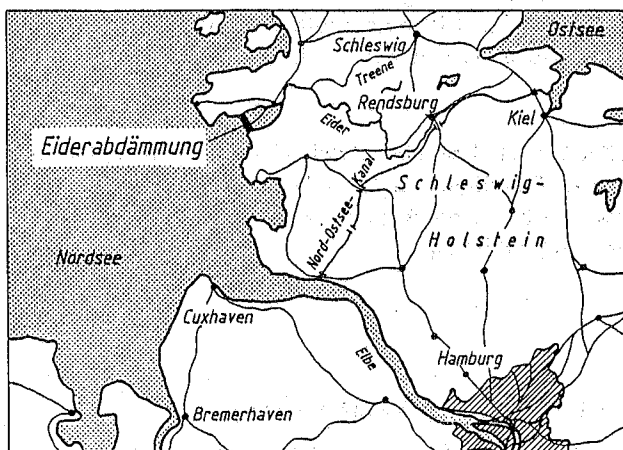


Bild 1: Lageplan

Nach umfangreichen Voruntersuchungen wurde am 03.08.1965 gemeinsam vom Bundesminister für Verkehr

und dem Land Schleswig-Holstein der Bau der Eiderabdämmung beschlossen, zu deren vordringlichsten Aufgaben damals wie heute

- die Sicherung der Eidermündung gegen Sturmfluten
- die Verbesserung der Vorflut für das Eider- und Treenegebiet
- und die Aufrechterhaltung der Schifffahrt auf der Eider

gehören.

Die in den Jahren 1967 bis 1973 fertiggestellte Eiderabdämmung besteht im wesentlichen aus den beiden Eiderdämmen Nord und Süd sowie dem eigentlichen Sperrwerk mit Sielbauwerk und Schifffahrtsschleuse (Bild 2). Planung und Bauausführung werden in verschiedenen Veröffentlichungen ([1] - [3]) detailliert beschrieben. Die bauliche Unterhaltung der Eiderabdämmung obliegt heute der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes.

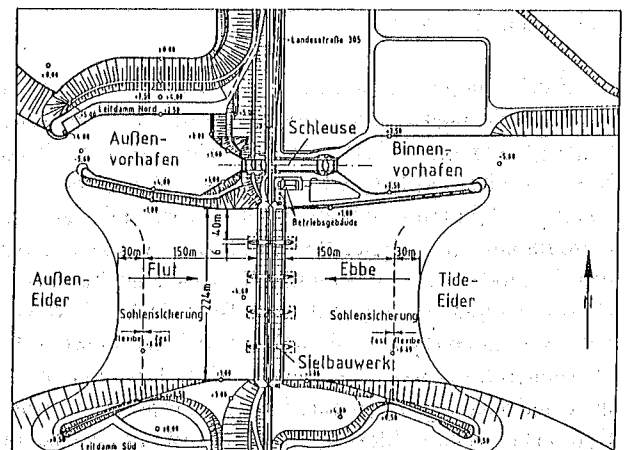


Bild 2: Übersicht Eiderabdämmung

1.2 Sielbauwerk

Das eigentliche Sielbauwerk besteht aus fünf Durchflußöffnungen von je 40 m Breite (Bild 3). Sie werden überspannt von fünf elliptisch geformten Wehrträgern, an denen jeweils binnen und seeseitig stählerne Sieltore zur Beeinflussung der ein- und ausströmenden Tidewassermengen befestigt sind. Der elliptische Wehrträgerquerschnitt wurde nicht nur unter architektonischen Gesichtspunkten ausgewählt, er bietet auch ein hinreichendes Lichtraumprofil für den Straßenverkehr, der im Inneren der Wehrträger über die Eider geführt wird.

Um bei den gewählten Stützweiten und den hohen Belastungen aus Eisdruck und Wellenschlag mit wirtschaftlichen Bauteilabmessungen auskommen zu können, wurden die Wehrträger in Spannbetonbauweise ausgeführt. Jeder der fünf gleichartigen Wehrträger besteht aus der eigentli-

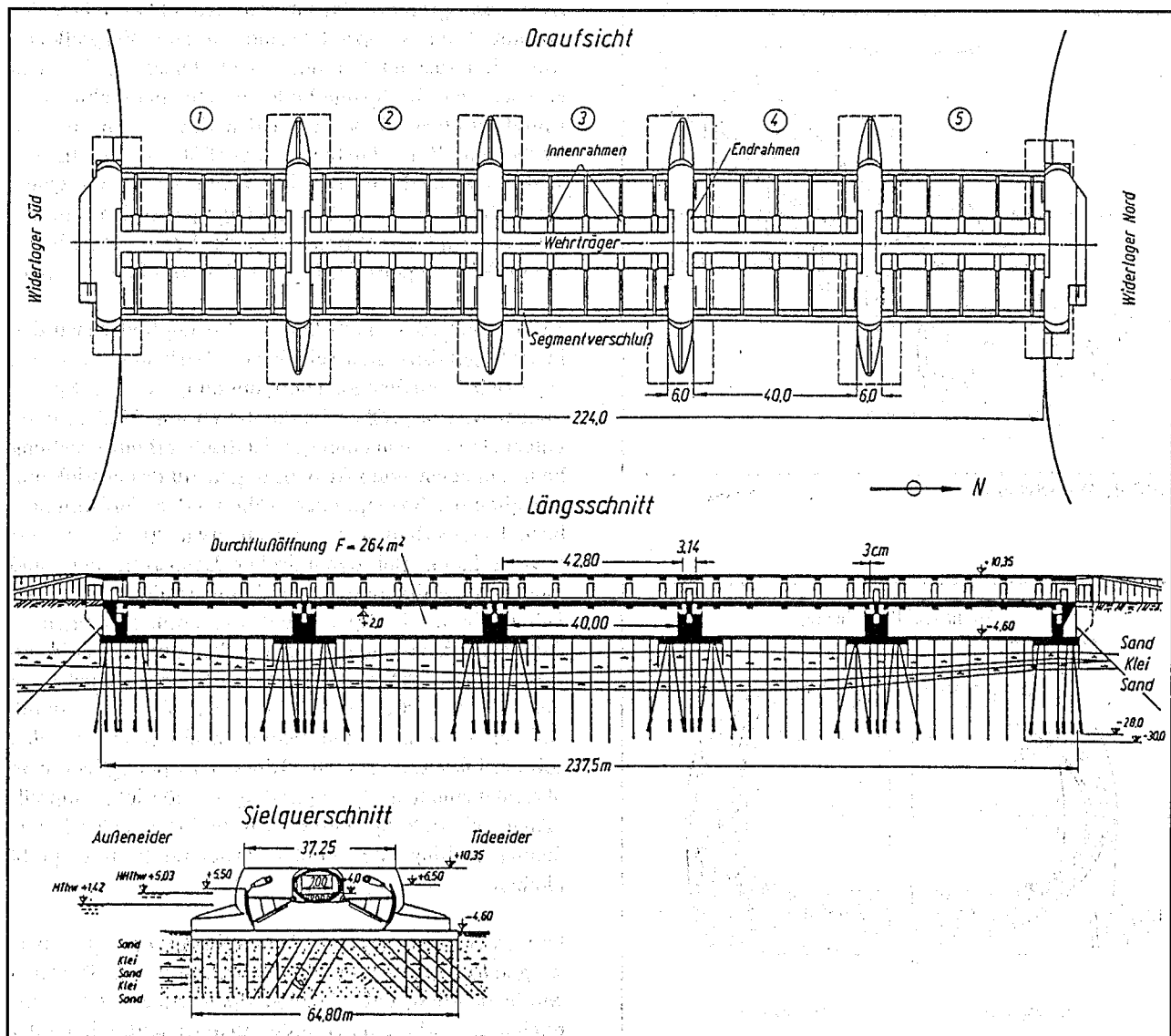
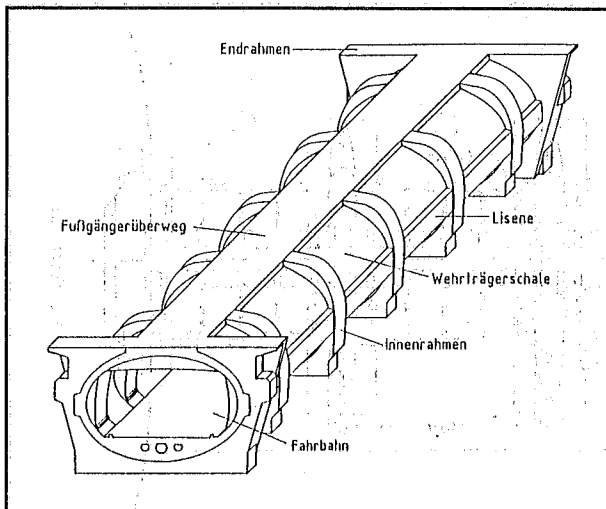
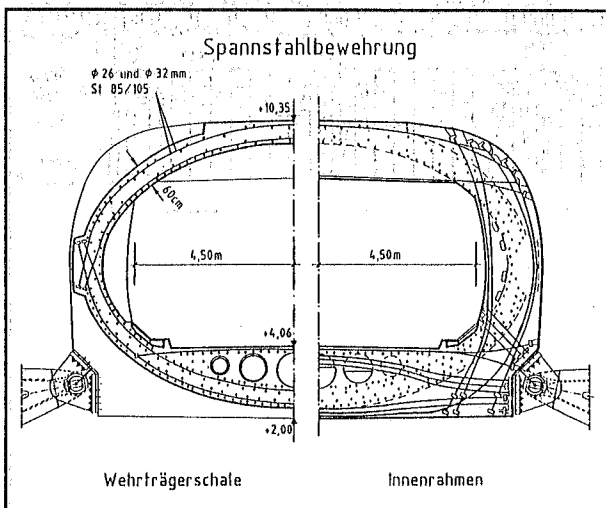


Bild 3: Sielbauwerk

chen, in Längs- und Querrichtung vorgespannten, 60 cm starken Wehrträgerschale, den beiden Endrahmen, fünf sogenannten Innenrahmen sowie je einer horizontalen Lisene see- und binnenseitig (Bild 4). In End- und Innenrahmen verlaufen ebenfalls zahlreiche, vorwiegend in Schalenumfangsrichtung angeordnete Spannglieder (Bild 5). Die Drehlager der Sieltore sind mittels Spanngliedern an den Innenrahmen befestigt, von wo aus die Lagerkräfte in die Wehrträgerschale eingeleitet werden. Über die beiden trapezförmig ausgebildeten, bündig mit den Pfeilerseitenflächen abschließenden Endrahmen eines jeden Wehrträgers werden die Kräfte aus der Wehrträgerschale über Neotopflager in die Pfeiler bzw. Widerlager abgetragen. Eingebaut wurden je Wehrträger in Längsrichtung 368, in Querrichtung 800 Einzelstabspannglieder mit 26 bzw. 32 mm Durchmesser in Hüllrohren aus gewelltem Blechrohr mit 32 bzw. 38 mm Durchmesser, insgesamt also 5840 Spannglieder.

2 Instandsetzung der Spannglieder

Im Jahr 1978 waren an einigen Innenrahmen im oberen Wehrträgerbereich erste Risse im Beton zu erkennen, die nach und nach an allen Innenrahmen auftraten. Daraufhin wurden im Jahr 1982 intensive Untersuchungen in diesen Bauwerksbereichen durchgeführt, die zeigten, daß sowohl der hier zur Abdeckung von Spanngliedköpfen eingebrachte Zweitbeton wie auch Teilbereiche des Erstbetones der Innenrahmen von Rissen durchzogen waren. Im Jahr 1983 entschloß man sich, den gesamten Zweitbeton sowie den Erstbeton, soweit geschädigt, durch Stemmen abzutragen und die Spanngliedköpfe zu entrostern und zu konservieren. Anschließend sollten die abgetragenen Bereiche durch eine neue, mit dem Altbeton über eine aufgedübelte Bewehrung verbundene, gegenüber der ursprünglichen Bauwerkskontur allseitig um 10 cm vergrößerte Ortbetonschicht ersetzt werden.

**Bild 4:** Wehrträger**Bild 5:** Spanngliedführung in Innenrahmen und Wehrrägerschale

Im Zuge dieser Instandsetzungsmaßnahmen wurden einige nicht oder nur unzureichend verpreßte Spannglieder vorgefunden. Da der Verdacht nahe lag, daß noch weitere Spannglieder Verpreßmängel aufweisen könnten, beauftragte das zuständige Wasser- und Schiffsamt Tönning die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der Universität Braunschweig mit der systematischen Untersuchung des Verpreß- und Korrosionszustandes der Spannbewehrung des gesamten Bauwerkes und der Erstellung eines Instandsetzungskonzeptes.

Zur Auffindung unverpreßter Spanngliedabschnitte wurden zunächst ausgewählte Bauwerksbereiche mit Hilfe eines Linearbeschleunigers durchstrahlt ([4]). Anschließend wurde ein Teil der als möglicherweise unverpreßt identifizierten Spannglieder, soweit mit vertretbarem

Zerstörungsgrad der Bausubstanz erreichbar, angebohrt und mittels Endoskop auf den tatsächlichen Verpreß- und Korrosionszustand hin untersucht. Diese Stichproben ergaben, daß die Spannglieder in den Innenrahmen im Mittel zu etwa 70 %, die in den Endrahmen zu etwa 37 % mit Einpreßmängeln behaftet waren. In der Wehrrägerschale wiesen im Mittel 20 % der Querspannglieder sowie 40 % der Längsspannglieder in den Wehrrägern I und II bzw. 10 % der Längsspannglieder in den Wehrrägern III, IV und V Verpreßmängel auf.

An den einpreßmängelbehafteten Spanngliedern wurden in der Regel Korrosionsschäden mit Narbentiefen von bis zu etwa 0,2 mm diagnostiziert, nur einige wenige Spannglieder wiesen größere Narbentiefen auf. Narbentiefen unter 0,2 mm haben unter quasistatischer Beanspruchung keine nennenswerten Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten der Spannglieder, während das Verformungs- bzw. Dehnverhalten um bis zu etwa 20 % reduziert werden kann. Bei dynamischer Beanspruchung sind hingegen signifikante Abminderungen der ertragbaren Schwingbreite des Spanngliedes zu berücksichtigen.

Auf Basis der so gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Konzept erarbeitet, wonach mit Verpreßmängeln behaftete Spannglieder, die mit vertretbarem Aufwand durch Anbohren zu erreichen waren, nachinjiziert werden sollten. Dies war in erster Linie bei Spanngliedern in oberflächennahen Spanngliedlagen möglich, einpreßmängelbehaftete Spannglieder in tieferliegenden Mehrfachlagen hingegen mußten größtenteils unverpreßt bleiben.

Das Nachverpressen der Spannglieder erfolgte überwiegend im sogenannten Vakuumverfahren ([5]). Dabei wurde deutlich, daß einzelne Spannglieder z.T. weitreichende Verbindungen untereinander und, wie an der Bauwerksaußenseite austretendes Injektionsmaterial zeigte, sogar zur Außenatmosphäre aufwiesen. Ein in Anbetracht der Spanngliedgeometrie teilweise ungewöhnlich hoher Verbrauch an Verpreßgut war zudem ein Anzeichen für das Vorhandensein größerer Betonfehlstellen. Die auch nach Abschluß der Spanngliedinstandsetzung möglicherweise noch vorhandenen Verbindungen unverpreßter Spannglieder zur Außenatmosphäre sollten durch die Applikation eines Oberflächenschutzsystems auf der gesamten Wehrrägeraußenfläche zumindest unterbrochen werden.

Eine statische Neubewertung des Bauwerkes unter Berücksichtigung modifizierter, am Leichtweißinstitut der Universität Braunschweig in Modellversuchen erarbeiteter Lastansätze sowie verschiedener Annahmen zur weiteren Schadensentwicklung während der Nutzungsdauer wird zur Zeit durchgeführt.

3 Betoninstandsetzung an Wehrträger I

3.1 Bauwerkssituation

Korrosionsschutz der Bewehrung

Voraussetzung für die Korrosion von Stahl in Beton ist die gleichzeitige Anwesenheit eines Elektrolyten mit hinreichender Ionenleitfähigkeit im umgebenden Beton, eines ausreichenden Sauerstoffangebotes an der Kathode und einer ungehindert ablaufenden Eisenauflösung. Bei Beton von Außenbauteilen genügt i.d.R. die sich aufgrund der klimatischen Umgebungsbedingungen in den Betonporen einstellende Ausgleichsfeuchte zur Ausbildung eines Elektrolyten. Der Zutritt von Sauerstoff an den Stahl wird in erster Linie von der Größe der Betondeckung, der Porenstruktur des Betones sowie dessen Sättigungsgrad beeinflusst. Ungehinderte Eisenauflösung ist nur möglich, wenn zuvor die aufgrund des hochalkalischen Porenwassers auf der Stahloberfläche entstandene Passivierungsschicht zerstört wird. Dies kann u.a. geschehen durch Senkung des pH-Wertes der wässrigen Betonphase infolge Carbonatisierung oder durch Vordringen freier Chloridionen in ausreichender Konzentration bis an den Stahl.

Die planmäßige Betondeckung der äußeren Bewehrungslage von Innenrahmen und Wehrträgerschale an der Bauwerksaußenseite beträgt 50 mm, die der Spanngliedhüllrohre mindestens 65 mm. Die am Wehrträger I tatsächlich vorgefundene Betondeckung sowohl des Betonstahles wie auch der Spannbewehrung war allerdings oftmals geringer.

Zement	375 Kg	PZ 375	Breitenburg
Zuschlag	725 Kg	0/3 mm	Elbe-Trave-Sand
	325 Kg	3/7 mm	Niederrhein
	755 Kg	7/30 mm	Niederrhein
Zusatzstoff	20 Kg	Trass	Meurin
Zusatzmittel	0,75 Kg	BV	Plastiment PHC

Tab. 1: Zusammensetzung des Wehrträgerbetons

Als Wehrträgerbeton war ein Beton B 450 nach der zur Bauzeit gültigen Fassung der DIN 1045 mit einem Wasser/Zement-Wert von etwa 0,49 vorgesehen (Tabelle 1). An in jüngster Zeit aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen wurden Druckfestigkeiten ermittelt, die im Mittel einer Festigkeit f_{w200} von 67 N/mm² entsprachen.

Die Carbonatisierungstiefe beträgt z.Z. maximal 6 mm, mit carbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion dürfte für die Nutzungsdauer des Bauwerkes nicht zu rechnen sein.

Bei ständiger Beaufschlagung mit Meerwasser können Chloride nach Sättigung der Poren mit Wasser nur über Diffusionsmechanismen in den Beton eindringen. Dagegen wird bei Betonen in der Wasserwechselzone und im Spritzwasserbereich durch den ständigen Wechsel zwischen Befeuchtung und zumindest teilweiser Austrocknung der Betonrandzonen Wasser im Kapillarporensystem bewegt, wodurch nach [6] und [7] wesentlich größere Mengen von Chloriden transportiert und im Beton angereichert werden können. Nach diesen Betrachtungen besonders gefährdet sind demnach die Betonflächen an der Unterseite des Wehrträgers. Sie liegen zwar mindestens 2.0 m über NN, werden aber durch den Tideeinfluß mehrmals täglich mit Spritzwasser beaufschlagt bzw. tauchen bei bestimmten Tide- und Witterungskonstellationen sogar zeitweise in das Wasser ein.

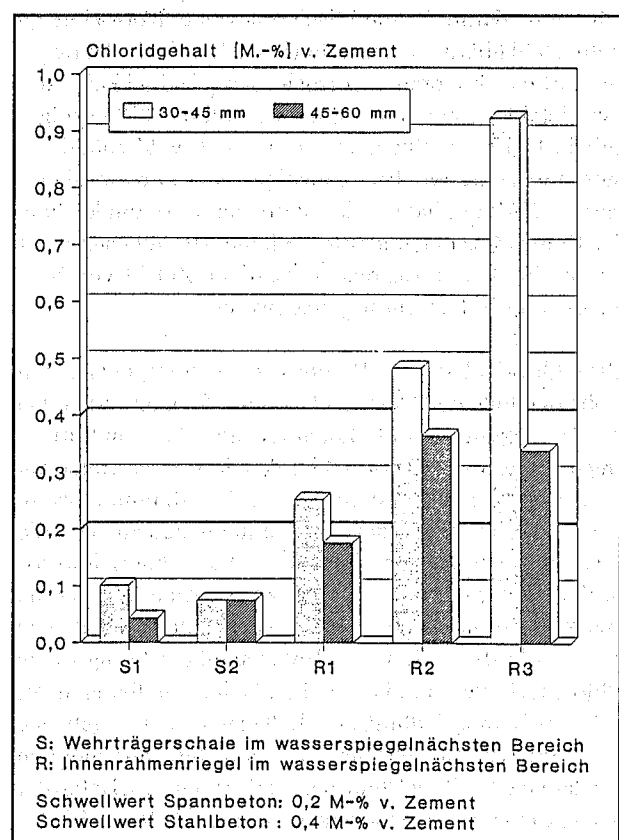


Bild 6: Chloridgehalt des Betones an der Wehrträgerunterseite

Bei entsprechenden Untersuchungen wurden die höchsten Chloridgehalte an Betonproben aus den Unterseiten und den Seitenflächen der Innenrahmen im wasserspiegelnächsten Bereich ermittelt (Bild 6). Erstaunlich war die Diskrepanz zu Proben aus dem unteren Scheitelpunkt der unmittelbar benachbarten, vergleichbaren Belastungen unterliegenden Wehrträgerschale. Hier müssen heute nicht mehr eindeutig nachvollziehbare Einflüsse aus der Bauzeit, wie die Verwendung verschiedener Schalungsmaterialien, unterschiedliche Nachbehandlungsintensitäten

oder unzulässige Veränderungen der Betonzusammensetzung zur Ausbildung verschiedener Porenstrukturen in den Betonrandzonen geführt haben. Die Ergebnisse entsprechender Betonstrukturuntersuchungen stehen noch aus.

Bekanntermaßen läßt sich kein allgemeingültiger Grenzwert des Chloridgehaltes im Beton angeben, dessen Überschreiten bei Vorhandensein eines Elektrolyten sowie eines ausreichenden Sauerstoffangebotes zwangsläufig zu Korrosion führen muß. Chloride werden vielmehr je nach Zementart und Porenstruktur des Betones in unterschiedlichem Maße chemisch und physikalisch gebunden, so daß der Anteil der sogenannten "freien" und damit korrosionswirksamen Chloridionen entsprechend variiert. Nach heutiger Auffassung muß der Chloridgehalt des Betones etwa 0,4 M-% des Zementgewichtes überschreiten, damit baupraktisch relevante Korrosion an Betonstahl überhaupt auftreten kann. Um der in der Regel wesentlich höheren Korrosionsempfindlichkeit des Spannstahles Rechnung zu tragen, sollte der Chloridgehalt in Höhe der Spannbewehrung 0,2 M-% möglichst nicht überschreiten. Eine günstige, weil korrosionshemmende Wirkung haben die relativ starke Betondeckung des Bauwerkes und der zumeist hohe Sättigungsgrad der Poren, die den korrosionsnotwendigen Zutritt von Sauerstoff an die Bewehrung erschweren.

Die Chloridgehalte des Betones der Wehrträgerschale in Höhe der äußeren Betonstahllage mit Maximalwerten von 0,1 M-% konnten mit Sicherheit als völlig unkritisch eingestuft werden. Da die Chlorideindringgeschwindigkeit nicht konstant ist, sondern mit der Zeit abnimmt, waren hier bei gleichbleibenden Randbedingungen auch für die Restnutzungsdauer des Bauwerkes keine korrosionskritischen Chloridanreicherungen zu erwarten. Anders die unteren Innenrahmenbereiche: Lokale Chloridgehalte von über 0,9 M-% in Höhe der Betonstahlbewehrung sowie Chloridgehalte von bis zu 0,4 M-% im Randbereich der äußeren Spanngliedhüllrohre ließen unter den gegebenen Verhältnissen Bewehrungskorrosion durchaus möglich erscheinen. Weitere Chloridanreicherungen im Beton der unteren Innenrahmenbereiche mußten zukünftig auf jeden Fall verhindert werden.

Betonschäden

In den Betonflächen an der Unterseite der Wehrträgerschale und der Innenrahmen fanden sich zahlreiche, teils von außen sichtbare, teils aber auch tiefer im Beton liegende Stahlteile wie Draht, Schrauben, Werkzeuge und Bewehrungsreste, die vor dem Betonieren nicht aus der Schalung entfernt worden waren und nun nach und nach zu korrodieren begannen. Die mit dem Korrosionsprozeß einhergehende Volumenvergrößerung führte zu Betonabplatzungen, welche die Dicke der schützenden Betondeckung an zahlreichen Stellen minimierte. An einigen Innenrahmen waren im Anschlußbereich der Drehlager

senkrecht zur Bauteiloberfläche verlaufende Risse mit Breiten von bis zu etwa 0,4 mm vorhanden, die zum Teil bis an die in diesem Bereich stark konzentrierte Spannbewehrung reichten. Die Betonoberfläche der oberen Trägerschalenhälfte wies zahllose, durch Lufteinschlüsse beim Betonieren hervorgerufene Lunker auf, die vereinzelt eine flächige Ausdehnung von mehreren Zentimetern und Tiefen von über einem Zentimeter besaßen. Gefügestörungen, Porenansammlungen, Arbeitsfugen mit Rißbildungen, unverschlossene Öffnungen für Schalungsanker und die o.g. Verbindungen einzelner Spannglieder zur Außenatmosphäre waren weitere Mängel, die die Dauerhaftigkeit dieses Wehrträgers beeinträchtigen konnten.

Potentialfeldmessungen

An ausgewählten Flächen an der Unterseite des Wehrträgers wurden Potentialfeldmessungen zur Beurteilung des Korrosionszustandes der Betonstahlbewehrung durchgeführt ([8], [9]). Bei diesem Untersuchungsverfahren nutzt man den Umstand, daß Bereiche mit korrodierender Bewehrung normalerweise ein wesentlich negativeres Ruhepotential aufweisen als intakte, passive Bereiche. Eine Bezugselektrode wird auf die Betonoberfläche aufgesetzt und das sich zwischen Bewehrungsstahl und Elektrode einstellende Potential mit Hilfe eines hochohmigen Spannungsmeßgerätes erfaßt. Durch systematisches Abtasten der Betonoberfläche mit der Bezugselektrode erhält man ein Raster mit Meßwerten. Große Absolutwerte, insbesondere aber hohe Potentialgradienten sind ein Anzeichen für Korrosionsprozesse. Die am Wehrträger I des Eidersperrwerkes durchgeführten Potentialfeldmessungen ergaben keine Anzeichen für das Vorhandensein großflächiger Bewehrungskorrosion. Einzelne aufgrund der Messungen prognostizierte Bereiche mit lokaler Bewehrungskorrosion konnten nach entsprechendem Betonabtrag auch als solche identifiziert werden.

3.2 Instandsetzungskonzept

Aufgrund der Unterschiede hinsichtlich Art und Umfang vorhandener Betonschäden, Chloridbelastung des Betones und Beanspruchung durch Meerwasser, Umwelt- und Betriebsbedingungen waren bereichsweise unterschiedliche Betoninstandsetzungsmaßnahmen erforderlich.

Bereich I

Bereich I umfaßte einen etwa 8 m breiten, in Wehrträgerlängsachse verlaufenden Streifen an der Unterseite der Wehrträgerschale sowie alle vertikalen und horizontalen Außenflächen der Innenrahmen in der unteren Wehrträgerhälfte. Ziel der Betoninstandsetzung in diesem Bereich mußte sein, den derzeit zwar noch vorhandenen, insbesondere aber durch hohe Chloridgehalte, korrodierende Stahleinschlüsse, Risse und Betonfehlstellen

gefährdeten Korrosionsschutz der außenflächennahen Bewehrung auch zukünftig zu sichern. Speziell eine weitere Anreicherung von Chloriden bis hin zu korrosionskritischer Konzentration in Höhe der Spannstahlbewehrung mußte auf jeden Fall verhindert werden. Dazu sollten zunächst die an den Innenrahmen im Drehlagerbereich vorhandenen Risse, soweit von der Rißbreite her möglich, mit einem Polyurethan injiziert werden.

Wie sich bei der Anlage von Versuchsflächen im Vorfeld der Instandsetzungsmaßnahme gezeigt hatte, genügte es nicht, nur die sichtbaren Stahleinschlüsse an der Wehrträgerunterseite durch Herausstemmen zu entfernen. Aufgrund der hohen Chloridbelastung in den Betonrandzonen, der im Wehrträgerbeton in ausreichendem Maße vorhandenen Feuchtigkeit und der nie gänzlich zu unterbindenden Sauerstoffzufuhr begannen nach und nach auch tieferliegende, von außen nicht ohne weiteres zu lokalisierenden Stahleinschlüsse zu korrodieren. Im Hinblick auf die in Teilbereichen hohen Chloridanreicherungen und die zahlreichen Betonfehlstellen wurde deshalb in Bereich I ein ganzflächiger Betonabtrag mit einer Tiefe von etwa 3 cm als sinnvoll erachtet. Als Betonersatz war ein kunststoffmodifizierter Spritzmörtel (SPCC) mit einem Größtkorn von maximal 4 mm, im folgenden als Schicht 1 bezeichnet, vorgesehen. Diese Schicht sollte zusammen mit dem nach Betonabtrag über der äußersten Bewehrungslage verbleibenden Altbeton eine Betondeckung von mindestens 5 cm ergeben sollte. Der kunststoffmodifizierte Spritzmörtel mußte nachweislich für das Umhüllen freiliegender Bewehrung und die Applikation unter schwingender Belastung geeignet sein, Randbedingungen also, deren Auftreten beim vorliegenden Objekt nicht gänzlich auszuschließen war.

Auf die spritzrauh zu belassende Schicht 1 sollte als Untergrund für das abschließend zu applizierende Oberflächenschutzsystem ein systemverträglicher Spritzmörtel bzw. Glättspachtel, im folgenden als Schicht 2 bezeichnet, in einer Schichtdicke von maximal 1 cm aufgebracht und geglättet werden. Eine intensive Nachbehandlung der Spritzmörtelflächen sollte die Bildung von für den Korrosionsschutz der Bewehrung kritischen Rissen möglichst verhindern. Als Oberflächenschutzsystem war ein Polymer/Zement-Gemisch in einer Schichtstärken von mindestens 2 mm vorgesehen. Derartige Oberflächenschutzsysteme sollen u.a. die Aufnahme von Wasser und den darin gelösten Schadstoffen reduzieren und eine gewisse Rißüberbrückungsfähigkeit aufweisen, gleichzeitig aber ausreichend wasserdampfdurchlässig sein.

Hingewiesen sei auf das durch den Betonabtrag geänderte Tragverhalten des Wehrträgers: Die eingepprägten Spannungen aus Vorspannung und Eigengewicht müssen vom verbleibenden Restquerschnitt übernommen werden; die Spritzbetonschale wird sich nur an der Aufnahme

zusätzlicher, nach der Applikation des Spritzmörtels aufgetragener Lasten beteiligen.

Bereich II

Der Bereich II umfaßte die verbleibenden Außenflächen der Wehrträgerschale sowie die von außen zugänglichen Endrahmenseitenflächen. Ziel der Instandsetzung in diesem Bereich mußte sein, den direkten Zutritt korrosionsfördernder Stoffe zur Bewehrung, insbesondere zur Spannbewehrung, über Betonfehlstellen und Risse zukünftig zu unterbinden. Nach dem Sandstrahlen, der Ausbesserung sichtbarer Fehlstellen mit einem kunststoffmodifiziertem Mörtel (PCC) und dem Auftrag einer Lunkerspachtelung sollte deshalb in Bereich II das gleiche Oberflächenschutzsystem wie in Bereich I aufgebracht werden.

Aspekte zur Materialauswahl

Eingesetzt werden sollten nur nach ZTV-SIB 90 ([11]) zugelassene Instandsetzungsmaterialien und -verfahren. Die ZTV-SIB 90 und die nach dieser Vorschrift geprüften Materialien genügen wohl dem derzeit aktuellsten Stand der Betoninstandsetzung in Deutschland. Hier werden aber nicht nur, wie ansonsten bei Regelwerken üblich, seit langem bekannte und bewährte Verfahren und Stoffe erfaßt. Vielmehr wurde versucht, einen stark expansiven und innovativen Marktbereich zu ordnen und die Qualität der angebotenen Instandsetzungsprodukte durch Laborprüfungen transparent zu machen. Über die Dauerhaftigkeit geprüfter Instandsetzungsmaterialien, insbesondere die von kunststoffmodifizierten Produkten, am Bauwerk selbst existieren allerdings nur beschränkte Langzeiterfahrungen. Im vorliegenden Fall kam hinzu, daß die auf den Wehrträger aufgrund seiner exponierten Lage einwirkenden Belastungen ungleich stärker sein dürften als bei üblichen Brückenbauwerken, für die die ZTV-SIB 90 in erster Linie konzipiert wurde. Die geplante Instandsetzungsmaßnahme hatte also letztlich auch im Hinblick auf die in den nächsten Jahren anstehende Betoninstandsetzung der verbleibenden vier Wehrträger den Charakter einer Probeinstandsetzung. Deshalb sollten soweit als möglich Materialien verschiedener Hersteller bereichsweise nebeneinander eingesetzt werden. Die grundsätzliche Eignung verschiedener Materialien und Verfahren zur Instandsetzung von Meerwasserbauwerken wird z.Z. von der Bundesanstalt für Wasserbau im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht.

3.3 Wasserhaltung, Gerüst

Um die Baustelle tideunabhängig betreiben zu können und an der Wehrträgerunterseite einen ausreichend hohen Arbeitsraum zur Verfügung zu haben, wurden die auf die Wehrfeldsohle abgelassenen Sieltore von Tauchern abgedichtet und das so abgeschlossene Wehrfeld bis auf einen für die Auftriebssicherheit erforderlichen, von den

jeweiligen Außenwasserständen abhängigen Mindestwasserstand gelenzt. In die Wehrfeldsohle eingebaute Meßdosen sollten bei Überschreiten des maximal zulässigen Sohlwasserdruckes das rechtzeitige Fluten des Wehrfeldes ermöglichen.

Das Arbeitsgerüst wurde so konzipiert, daß von verschiedenen Ebenen aus die gesamte Wehrträgeraußenfläche zu erreichen war. Besonderer Wert wurde auf eine massive, sturmsichere, den Wehrträger vor Witterungseinflüssen, Zugluft und Salzwassergischt schützende Einhausung gelegt. Statt der sonst üblichen Kunststoffplanen kamen hier deshalb Wellblechplatten zum Einsatz.

3.4 Betonabtrag, Untergrundvorbehandlung

Der Abtrag des Betones im Bereich I an der Bauwerksunterseite erfolgte mittels Höchstdruckwasserstrahlen. Für den überwiegenden Teil der abzuarbeitenden Flächen wurde eine maschinell geführte Wasserstrahleinrichtung eingesetzt. Dieses Gerät bestand im wesentlichen aus einer oszillierenden Keramikdüse, die mittels einer Lineareinheit senkrecht und parallel zu einer Rahmenkonstruktion geführt werden konnte. Beim hier beschriebenen Bauvorhaben mußte die Düse über eine etwa 80 m lange Schlauchleitung von einer Dreikolbenpumpe mit 80 Liter Wasser pro Minute versorgt werden, der Wasserdruck an der Düse lag bei ca. 900 bar. Zum Erreichen der geforderten Abtragstiefe von etwa 3 cm waren je nach Betonbeschaffenheit 1 bis 3 Düsenüberstreichungen erforderlich. Für schwer zugängliche Bereiche wurde zusätzlich eine Handlanze mit feststehender Düse eingesetzt, durch die über einen Druckumsetzer 13 l Wasser pro Minute mit einem Druck an der Düse von ca. 3000 bar auf die Betonflächen gelangten. Trotz der hohen Betongüte und der schwierigen Geometrie der zu bearbeitenden Bauwerksbereiche mit einer Gesamtfläche von etwa 530 m² konnte der Abtrag ohne Probleme innerhalb von drei Wochen durchgeführt werden. Erstaunlich war die Konstanz, mit der die vorgesehene Abtragstiefe nach anfänglich erforderlicher Anpassung verschiedener Gerätekenngößen eingehalten werden konnte. Durch das Abtragsverfahren bedingte Schädigungen von ungewollt freigelegter Betonstahlbewehrung konnten nicht beobachtet werden, während in Teilbereichen ebenfalls freigelegte Spanngliedhüllrohre, obwohl ausreichend verpreßt, vereinzelt durch die Einwirkung der Wasserstrahlen aufgerissen wurden.

Nach dem Betonabtrag wurden die Wehrträgeraußenflächen in Bereich I und II sandgestrahlt.

3.5 Begutachtung der abgetragenen Betonflächen

Im Anschluß an den Betonabtrag bot sich die Möglichkeit, die Ergebnisse der in den Jahren zuvor durchgeführten Bauwerksuntersuchungen zu verifizieren und den Erfolg der Nachverpreßarbeiten an ungewollt freigelegten Spanngliedern zu überprüfen. An etwa 15 Stellen vornehmlich an der Unterseite der Innenrahmen wies die bereichsweise freigelegte Betonstahlbewehrung lokal begrenzte Bereiche mit z.T. tiefgreifender Korrosion auf, ein typisches Merkmal für chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. Auch einzelne Spanngliedverankerungen zeigten bereits ausgeprägte Korrosionsnarben.

Insbesondere an den Innenrahmen im Bereich der Drehlager fanden sich vereinzelt bis an die Spannbewehrung heranreichende oberflächenparallele Betonablösungen. Die hier im Bereich der Rißflanken liegende Betonstahlbewehrung war bereits stark korrodiert. Hinzu kamen mehr als faustgroße Betonfehlstellen, die auf mangelhafte Verdichtung in diesem durch extreme Bewehrungskonzentration gekennzeichneten Bereich zurückzuführen sind.

Der Verpreßgrad der in den letzten Jahren nachinjizierten Spannglieder erwies sich bei stichprobenartigen Untersuchungen als gut; das angewandte Verfahren darf mithin als geeignet angesehen werden.

3.6 Spritzmörtelauftrag

24 Stunden vor Auftrag der ersten Spritzmörtelschicht wurde der Betonuntergrund durch Wasserstrahlen mit einem Druck von 200 bar nochmals gereinigt und dabei gleichzeitig intensiv vorgeätzt. Der Auftrag der Spritzmörtelschicht 1, die zusammen mit dem verbliebenen Altbeton eine Betondeckung von 5 cm ergeben sollte, erfolgte kontinuierlich ohne größere Spritzpausen. Als Orientierungshilfe zur Einhaltung der angestrebten Gesamtschichtdicke diente den Düsenführern ein dichtes Netz von mittels Metalldübel in den Altbeton eingelassenen, mit einem Vorhaltemaß von 5 mm eingerichteten Maschinenschrauben.

Die spritzrauh belassenen Flächen wurden in den ersten Stunden durch Besprühen mit temperiertem Wasser feuchtgehalten. Spätestens zum Ende des jeweiligen Arbeitstages wurden die bis dahin fertiggestellten Teilflächen für mindestens 10 Tage mit feuchter Jute und Folie abgedeckt, soweit nicht vor Ablauf dieser Frist bereits die Spritzmörtelschicht 2 aufgebracht werden konnte.

Beim Aufbringen der Schicht 1 lag der Rückprallanteil im Bereich der Wehrträgerschale bei etwa 15 M.-%, im Bereich der Innenrahmen bei etwa 40 M.-%. Vor Auftrag der Spritzmörtelschicht 2 wurde Schicht 1 sandgestrahlt

Material	SPCC (Firma X)						SPCC (Firma Y)					
Trockenrohdichte 28d Lagerung B [Kg/dm ³]	2,068						2,096					
	Lagerung A			Lagerung B			Lagerung A			Lagerung B		
	7d	28d	90d	7d	28d	90d	7d	28d	90 d	7d	28d	90d
Druckfestigkeit [N/mm ²]	44,3	54,0	57,9	49,7	56,5	64,9	48,1	69,1	80,2	59,5	76,3	84,2
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	8,4	8,6	9,8	6,5	7,4	10,7	11,3	13,5	13,9	8,6	9,0	12,3
Schwinden 2.-90. d [mm/m]				-0,34	-0,48	-0,74				-0,44	-0,54	-0,77
Quellen 2.-90. d [mm/m]	+0,10	+0,17	+0,21				+0,09	+0,13	+0,16			
Dyn. E-Modul [N/mm ²]				31400	32400	32500				33300	34300	34400
Befrostung DBV-Verfahren	Nach 25 FTW: Volumenverlust = 0,5 %						Nach 25 FTW: Volumenverlust = 0,6 %					
Wasseraufnahmekoeffizient w_{24} [Kg/(m ² h ^{0,6})]	0,23						0,16					
Lagerung A: 2d feucht, dann unter Wasser bei T = 20 ± 2°C						Prüfkörper: Prismen 4x4x16 cm						
Lagerung B: 2d feucht, dann Normalklima DIN 50014 -23/50 - 2						Zylinder d/h = 10/4 cm (für Wasseraufnahmekoeff.)						

Tab. 2: Ergebnisse von Spritzmörteluntersuchungen

und vorgeätzt. Für Schicht 2 kam in Wehrträgerhälfte Nord ein spezieller kunststoffmodifizierter Ausgleichspachtel zum Einsatz, während in Wehrträgerhälfte Süd der dort bereits für Schicht 1 eingesetzte, nun lediglich durch einen höheren Wassergehalt weicher eingestellte SPCC verarbeitet wurde. Nach dem Spritzauftrag wurde Schicht 2 abgerieben, die Nachbehandlung erfolgte analog zu Schicht 1.

Die eingesetzten Spritzanlagen entsprachen den auch bei den Grundprüfungen der Spritzmörtel nach ZTV-SIB 90 verwendeten Gerätekonfigurationen.

3.7 Auftrag der Oberflächenschutzsysteme

Nach Abschluß der übrigen Betoninstandsetzungsmaßnahmen wurden in verschiedenen Bauwerksabschnitten die Oberflächenschutzsysteme zweier Hersteller auf die zuvor nochmals durch Wasserstrahlen gereinigten Wehrträgeraußenflächen aufgebracht. Der Auftrag dieser Systeme erfolgte jeweils in zwei Schichten im Spritzverfahren. Während des Auftrages wurde die Einhaltung der vorgesehenen Naßschichtdicken ständig durch Einstechen mit entsprechenden Lehren überprüft.

Eine Nachbehandlung war laut Herstellerangaben bei beiden Systemen nicht notwendig. Die fertiggestellten Flächen wurden deshalb in den ersten sieben Tagen nach

dem Auftrag lediglich vor Witterungseinflüssen geschützt.

Beim Spritzauftrag von Oberflächenschutzsystemen kommt es in Bereichen, in denen Flächen winklig aufeinanderstoßen, schon aufgrund der geometrischen Gegebenheiten zu Materialanreicherungen. Wie sich bei vorangegangenen Instandsetzungsmaßnahmen gezeigt hatte, neigen die verwendeten Polymer-Zement-Gemische während der Aushärtung an diesen Stellen aufgrund der dann bereichsweise unterschiedlichen Festigkeitsentwicklung zur Rißbildung. Durch die Ausbildung von Hohlkehlen kann hier Abhilfe geschaffen werden.

3.8 Materialuntersuchungen

Die eingesetzten Instandsetzungsmaterialien wurden sowohl im Vorfeld der Baumaßnahme wie auch baubegleitend intensiven Laboruntersuchungen unterworfen. An dieser Stelle sollen aus dem gesamten Untersuchungsspektrum lediglich einige Ergebnisse von Materialprüfungen angeführt werden, die an den beiden bereichsweise nebeneinander eingesetzten Spritzmörteln (SPCC) durchgeführt worden sind. Dazu wurden parallel zum Auftrag der als Schicht 1 bezeichneten Spritzmörtelschicht in über Kopf am Bauwerk befestigten Stahlpfannen 4 bzw. 12 cm dicke Spritzmörtelplatten hergestellt, aus denen im Alter von zwei Tagen Prüfkörper in Form von Prismen bzw. Zylindern herausgearbeitet worden

sind. An diesen Prüfkörpern wurden nach unterschiedlicher Vorlagerung u.a. Untersuchungen in Anlehnung an DIN 18551 ([12]) und ZTV-SIB 90 durchgeführt. In Tabelle 2 sind exemplarisch einige der ermittelte Prüfergebnisse aufgeführt.

Weitere Prüfkörper werden derzeit längerfristig unter verschiedenen Randbedingungen gelagert und sollen parallel zu den für die nächsten Jahre vorgesehenen Begutachtungen der instandgesetzten Bauwerksbereiche untersucht werden.

Schrifttum

- [1] XXIIIrd International Navigation Congress, Section II Subject 2: Structures on the stretches at the mouths of the German tidal rivers and their action on the movement of sand, Ottawa 1973
- [2] Cordes, F.; Fedders, H.; Albrecht, U.: Der Wehrträger des Eidersperrwerkes, Beton- und Stahlbetonbau, 10/72 S. 217-228
- [3] Cordes, F.: Eiderdamm Hundeknöll-Vollerwiek, Die Bautechnik 1970/71/72
- [4] Knieß, H.-G.: Verfahren zur Untersuchung von Spanngliedern, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 4/86 Nr.58 S. 131 - 167
- [5] Kordina, K.; Osteroth, H.-H.: Zum nachträglichen Verpressen schwer zugänglicher Spannglieder, Bauingenieur, 62(1987) S. 159-164
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 393: Korrosion von Stahl in Beton, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1988
- [7] Nürnberger, Ulf: Chloridkorrosion von Stahl in Beton, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 9/84 S. 601-612, 10/84 S. 697-704
- [8] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: Merkblatt für elektrochemische Potentialmessung zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion an Stahlbetonbauwerken, April 1990
- [9] Menzel, K.; Preusker, H.: Potentialmessung: Eine Methode zur zerstörungsfreien Feststellung von Korrosion an Bewehrung, Bauingenieur, 64(1989) S. 181-186
- [10] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, Technische Universität München, Berichte aus dem Baustoffinstitut, Heft 1/1991
- [11] Bundesminister für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, ZTV-SIB 90, Verkehrsblatt-Verlag Dortmund
- [12] DIN 18551 Spritzbeton, Herstellung und Güteüberwachung, Ausgabe März 1992, Beuth Verlag GmbH Berlin
- [13] Knufmann, T.; Westendarp, A.: Instandsetzung am Eidersperrwerk, Beton 7/92, S. 377 - 382