

Instandsetzung unter Betrieb mit einem schnell erhärtenden Spritzbeton – Probemaßnahme Schleuse Feudenheim

Dr.-Ing. Thorsten Reschke, Bundesanstalt für Wasserbau

1 Ausgangssituation und Zielstellung

1.1 Instandsetzungsbedarf und -möglichkeiten

Ein Großteil der Schleusen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes hat ein Alter von mehr als 70 Jahren erreicht und entsprechend groß ist der Instandsetzungsbedarf an den Betonbauteilen dieser Bauwerke. Auf Grund der geringen Qualität der Altbetone, ihrer zumeist hohen Durchfeuchtung und den oft ausgeprägten Rissen und offenen Arbeitsfugen sind dünn-schichtige Instandsetzungssysteme in vielen Fällen ungeeignet. Bei der Betoninstandsetzung wird daher in der Regel der teilweise oder vollständige Ersatz der Schleusenkammerwände vorgezogen oder es werden Vorsatzschalen aus Ort- oder Spritzbeton mit Dicken von 30 cm und mehr ausgeführt. Insbesondere Ortbetonvorsatzschalen haben sich in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Maßnahme bei Kammerwandinstandsetzungen bereits vielfach bewährt. Ein großer Nachteil dieser konventionellen Instandsetzungsverfahren ist bisher, dass die betreffende Schleusenkammer für die Durchführung der Baumaßnahme ca. ½ bis 1 Jahr für die Schifffahrt gesperrt werden muss. Dies kann bei Wasserstraßen mit nur einer Schleusenkammer je Stauanlage zu einer Verlagerung des Transportaufkommens auf Schiene und Straße führen, das nur schwer wieder für die Wasserstraße zurück gewonnen werden kann.

Ziel war es daher, ein Bauverfahren für die Instandsetzung von 1-Kammer-Schleusenanlagen zu finden, welches bei Aufrechterhaltung der Schifffahrt „unter Betrieb“ realisierbar ist, sodass die ansonsten mehrmonatigen Sperrzeiten vermieden werden können.

1.2 Lösungsansätze für Instandsetzungen „unter Betrieb“

Bei Instandsetzungen „unter Betrieb“ sind bestimmte Randbedingungen einzuhalten insbesondere hinsichtlich:

- Der für die Arbeiten zur Verfügung stehenden (i. d. R. kurzen) Zeitfenster,
- der Baustelleneinrichtung bei laufendem Schleusenbetrieb,
- des freizuhaltenden Lichtraumprofils innerhalb der Kammer während der Arbeiten,
- einer evtl. Gefährdung der Schifffahrt.

Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an den Betonabtrag sowie – bei den Verfahren unter Verwendung von Beton und Spritzbeton – auch an die Erhärtungscharakteristik dieser Materialien (schnelle Erhärtung innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeitfenster).

Grundsätzlich sind die nachfolgend aufgeführten Lösungsansätze denkbar, wobei die Machbarkeit unter den o. g. Randbedingungen teilweise eingeschränkt ist:

- (1) Vorsatzschale aus Ortbeton,
- (2) Vorsatzschale aus Spritzbeton,
- (3) Vorsatzschale aus Fertigteilen,
- (4) Vorsatzschale aus Spundwandprofilen,
- (5) Vorsatzschale aus Stahlprofilen.

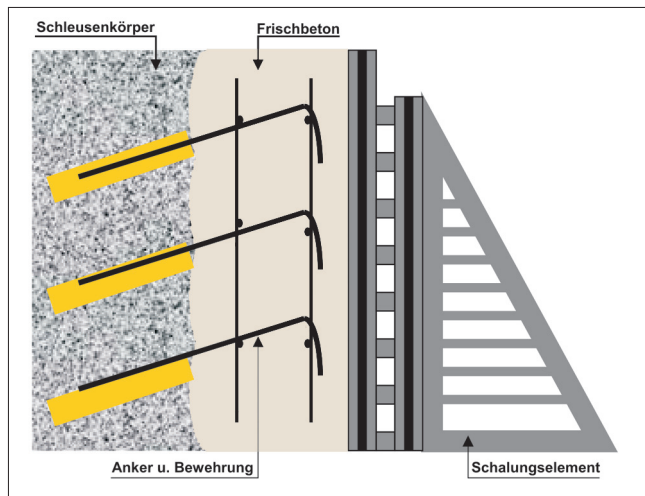


Bild 1: Vorsatzschale aus Ortbeton

Bei der Variante (1) besteht die Problematik insbesondere in dem Schalungselement, welches während der Schifffahrtsphasen entfernt werden muss (Bild 1). Ggf. ist eine Weiterentwicklung mit einem an der Wand verankerten Schalsystem möglich, was jedoch bei schwachen Altbetonen problematisch ist.

Die Variante (2) ist auch bei den vorgesehenen kurzen Zeitfenstern (Arbeiten nur während der Nacht, ca. 8 h) machbar, sofern entsprechend schnell erhärtende Spritzbetone zur Verfügung stehen.

Theoretisch sind auch die Instandsetzungsvarianten (3), (4) und (5) denkbar. Für die praktische Umsetzung sind hier allerdings noch grundlegende, meist auch objektspezifische Überlegungen zur baulichen Ausbildung (z. B. Verankerung) notwendig, sodass diese im Zusammenhang mit der Probeinstandsetzung nicht weiter verfolgt wurden.

1.3 Ausgewähltes Instandsetzungskonzept und Probeinstandsetzung

Als Instandsetzungskonzept wurde – in Anlehnung an die klassische und bewährte Bauweise – die Variante (2) „Vorsatzschale aus Spritzbeton“ (Bild 2) in Verbindung mit einem schnell erhärtenden Spritzbeton favorisiert. Bei dieser Variante war auf Grund umfangreicher Voruntersuchungen zu erwarten, dass die Vorsatzschale bereits wenige Stunden nach ihrer Herstellung wieder belastet werden kann sowie die Dauerhaftigkeit für alle relevanten Beanspruchungen sichergestellt ist.

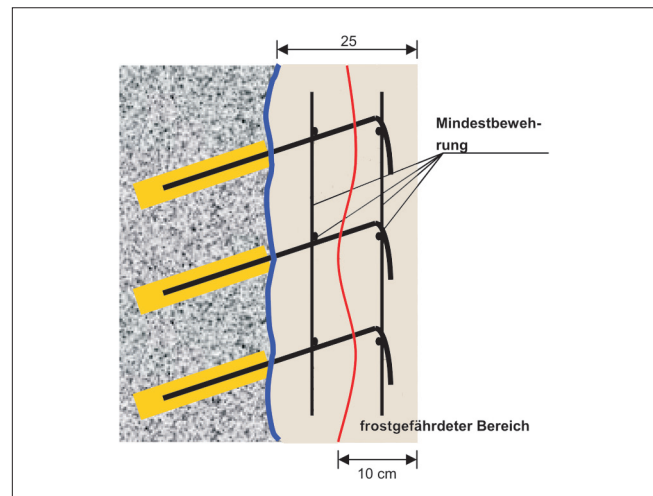


Bild 2: Vorsatzschale aus Spritzbeton

Die Eignung des neuen Instandsetzungsverfahrens wurde im Rahmen einer Probeinstandsetzung an der mittleren Schleusenammer der Eingangsschleuse Feudenheim am Neckar unter Praxisbedingungen untersucht. Mit dem Versuch wurde die Durchführbarkeit an einem Kammerwandblock für alle wesentlichen Arbeitsschritte wie Abtrag des Altbetons, Einbau von Verankerung und Bewehrung, Herstellung und Einbau des Spritzbetons sowie Einbau von Ausrüstungsteilen überprüft. Die Bauausführung erfolgte durch eine auf Instandsetzungen spezialisierte Fachfirma (W+S Bau GmbH, Kassel). Die Maßnahme wurde von der BAW eng begleitet sowie aus Sicht der bauausführenden Firma und des Auftraggebers ausführlich dokumentiert [1], [2].

2 Randbedingungen

2.1 Baulicher Zustand des Bauwerks

Ausschlaggebend für die Wahl der mittleren Schleusenammer Feudenheim waren vornehmlich die beiden folgenden Punkte:

- Die Kammerwände der mittleren Schleusenammer Feudenheim befinden sich in einem schlechten baulichen Zustand. Die mittlere Kammer weist die für Schleusen dieses Alters typischen Schäden auf und ist dringend instandsetzungsbedürftig (siehe Bild 3). Die grundsätzliche Notwendigkeit zur Instandsetzung der mittleren Schleusenammer war bereits 1988 in einem Gutachten der BAW festgestellt worden. Mit dem Versuch konnte also ein Beitrag zur notwendigen Instandsetzung der Kammer geleistet werden.



Bild 3: Zustand der Kammerwand vor der Instandsetzung

- Die in Feudenheim vorhandenen drei Schleusenkammern boten Gewähr dafür, dass auch im Falle nicht vorhersehbarer Schwierigkeiten und Probleme bei der Umsetzung des Versuchs eine Sperrung der mittleren Schleusenkammer nicht zu einer Beeinträchtigung der Schifffahrt führen würde.

Für die Erprobung wurde der Kammerblock H 5/5 – H 5/6 der mittleren Kammer ausgewählt, da er durch die darin zu ersetzenden Nischenpoller und die Steigleiter erhöhte Anforderungen an das Instandsetzungsverfahren stellte. Die Druckfestigkeit des Betons des Kammerwandblocks liegt im Mittel bei $7,6 \pm 3,5 \text{ N/mm}^2$, die Schwankungsbreite der Einzelwerte reicht von $2,8 \text{ N/mm}^2$ bis $66,0 \text{ N/mm}^2$. Für den rechnerischen Nachweis kann nur von der fiktiven Betonfestigkeitsklasse B 1,5 ausgegangen werden. Die Spaltzugfestigkeit beträgt im Mittel $0,60 \pm 0,59 \text{ N/mm}^2$. Bei diesen Kennwerten muss beachtet werden, dass nur die prüfbareren Teilstücke von Bohrproben untersucht werden konnten, ein nicht unwesentlicher Teil der Proben bestand aus Haufwerk.

2.2 Technische Anforderungen

Die Anforderungen an den Beton der Vorsatzschale ergeben sich aus der ZTV-W LB 219 [3]. Die Vorsatzschale muss demnach den folgenden über Expositionsklassen beschriebenen Einwirkungen standhalten:

- XC2: Bewehrungskorrosion infolge Carbonatisierung.
- XW2: Wechselnde Beanspruchung mit Süßwasser.
- XF3: Frost, hohe Wassersättigung.
- XM1: Schifffahrt, Eisgang.
- XRD: rückseitige Durchfeuchtung.

Die BAW hatte einen umfangreichen Anforderungskatalog aufgestellt, dem ein schnell erhärtender Spritzbeton für derartige Anwendungszwecke genügen muss. Hier stehen insbesondere die Festigkeiten und die Dauerhaftigkeitseigenschaften im jungen Alter (nach wenigen Stunden) im Vordergrund. Die wesentlichen Anforderungen der BAW bezüglich der Eignungsprüfungen für nicht bauaufsichtlich zugelassene Spritzbetonzemente bzw. die damit hergestellten Spritzbetone sind in Tabelle 1 aufgeführt.

In einem umfangreichen Untersuchungsprogramm im Vorfeld des Probeversuchs wurde nachgewiesen, dass der zur Anwendung vorgesehene Spritzbeton alle von der BAW definierten Anforderungen erfüllt. Basierend auf diesen Voruntersuchungen, den am alten Bauwerk ermittelten Materialkennwerten, der statischen Berechnung der neuen Betonvorsatzschale sowie aus der geplanten Herstelltechnologie (8 h Zeitfenster Betoneinbau, davon 4 h Erhärtungszeit bis zur Belastung) wurden die Mindestanforderungen an das Material für den Einsatz an der Schleuse Feudenheim wie folgt festgelegt:

- Mindestdruckfestigkeit nach 4 h (Mittelwert/ kleinster Einzelwert): $15 \text{ N/mm}^2 / 12 \text{ N/mm}^2$,
- Druckfestigkeit 28 d: $\geq 40 \text{ N/mm}^2$,
- Statischer E-Modul 28 d: $\leq 30.000 \text{ N/mm}^2$,
- Schwinden: Schwindmaß 180 Tage $\leq 1,0 \text{ mm/m}$; Schwindrinne keine Risse,
- Wassereindringtiefe 28 d: $< 30 \text{ mm}$.

Die Einhaltung dieser Kennwerte wurde an gesondert hergestellten Spritzplatten überprüft.

Bei der statischen Bemessung der Vorsatzschale war neben dem vollen Spaltwasserdruck die Überlagerung aus Last und Zwang zu Grunde zu legen. Die Bemessungsunterlagen wurden von der ARCADIS Consult GmbH aufgestellt und sind in [1] ausführlich dokumentiert. Es wurden die statischen Nachweise für die Vorsatzschale geführt sowie Angaben über deren Verankerung gemacht. Auf Grund der geringen Betongüte wurde festgelegt, die Tragfähigkeit der Vorsatzschalen-Anker durch Zugversuche im Bestand zu überprüfen.

Prüfgegenstand	Nr.	Prüfungen
Zementprüfungen nach EN 196	1	Hauptbestandteile
	2	Mahlfeinheit, Erstarren, Raumbeständigkeit, Druckfestigkeit, Mineralogische Zusammensetzung Zementstein
Betonprüfungen in Anlehnung an die DIBT-Zulassungsprüfung von Spritzbetonzementen mit Zusatzmittel	3	Druckfestigkeit ¹⁾ nach 4, 5, 6, 24 Stunden sowie 3, 7, 28, 90 Tage, 1 und 3 Jahre
	4.1	Schalllaufzeit und Spaltzugfestigkeit ²⁾ nach 4, 5, 6, 24 h
	4.2	Spaltzugfestigkeit ¹⁾ 3, 7, 28, 90 Tage, 1 und 3 Jahre
	5	E-Modul, statisch ¹⁾ nach 24 Stunden sowie 3, 28 Tage, 1 und 3 Jahre
	6	freies Schwinden 0, 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 Tage, 1 und 3 Jahre zusätzlich Schwindrinne
	7.1	Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren (Prüfbeginn 28 Tage)
weitergehende Betonprüfungen für die Bewertung der Eignung bezüglich der Dauerhaftigkeitsanforderungen an den Beton	7.2	Gefrierbeständigkeit ²⁾ nach 4 und 24 Stunden (Prüfkörper einem FTW unterziehen, anschließend vergleichend zu den Referenzkörpern aus 4.1 Prüfung der Schalllaufzeit und der Spaltzugfestigkeit)
	8	Wasseraufnahme bei 0 und 150 bar 90 Tage
	9	Quecksilberdruckporosimetrie 90 Tage
	10	WU-Prüfung 28, 90 Tage
	11	Carbonatisierung 28, 90, 180 Tage, 1 und 3 Jahre
<p>¹⁾ Mindestanforderungen an Festigkeitswerte des Spritzbetons</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mindestdruckfestigkeit nach 4 Stunden: Mittelwert 15 N/mm² ; kleinster Einzelwert 12 N/mm² – Mindestspaltzugfestigkeit aus Druckfestigkeit ($\beta_{SZ} = 0,232 \beta_d^{2/3}$) – E-Modul 28 Tage ≤ 30.000 N/mm² (vergleichbar E-Modul Altbeton) <p>²⁾ Bewertungskriterien Spaltzugfestigkeit und Gefrierbeständigkeit bis 24 Stunden:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung Laufzeit < 30 % gegenüber Referenzkörper – Verminderung Spaltzugfestigkeit < 30 % gegenüber Referenzkörper 		

Tabelle 1: Materialanforderungen im Rahmen der Eignungsprüfungen

2.3 Betriebliche Randbedingungen

Als wichtigste betriebliche Randbedingung wurde vor Beginn des Versuchs festgelegt, dass die Instandsetzung bis zum Unterwasserstand unter Aufrechterhaltung des Betriebs der Schleuse erfolgen sollte. Alle Arbeiten zur Herstellung der Vorsatzschale sollten daher in betriebsarmen Zeiten, d. h. in den Nachtstunden, ablaufen. Die Schleusenkammer war nach jeder Arbeitsschicht so zu verlassen, dass sie unmittelbar danach für einen gefahr- und reibungslosen Schiffsverkehr zur Verfügung stand. Zur Erfüllung dieser Forderung sollten alle Arbeiten von einem Ponton aus erfolgen, der bei Schichtbeginn in die Kammer einfährt und über die Regelung des Kammerwasserstandes auf die erforderliche Arbeitshöhe gebracht wird.

Das Gebot der Vermeidung jeglichen Risikos für die Schifffahrt hatte wegen der niedrigen Qualität des Altbetons für den Bauablauf die Konsequenz, dass die Vorsatzschale in 5 horizontalen Abschnitten von ca. 2 m Höhe, sog. „Lamellen“, schrittweise erstellt werden sollte. Gegen ein vollständiges Abfräsen der Kammerwandoberfläche vor Beginn der Verankerungs-, Bewehrungs- und Spritzbetonarbeiten sprach, dass der Altbeton bei diesem Vorgehen über längere Zeit den Belastungen aus wechselnden Wasserständen, mechanischen Belastungen und Temperaturwechseln ausgesetzt gewesen wäre. Möglicherweise herabfallende Betonbruchstücke und die zeitweise großflächig offen liegenden Anker und Bewehrung hätten eine Gefahr für die Schifffahrt bedeutet. Außerdem wäre das Risiko von Beschädigungen an der Vorsatzschale in Zwischenstadien ihrer Herstellung erhöht gewesen.

Für die oberen drei Lamellen wurden Zeitfenster von 8 h Dauer (22:00 Uhr bis 6:00 Uhr) festgelegt, außerhalb derer die Schleusenkammer nicht durch den Arbeitsponton belegt sein durfte. In den unteren beiden Lamellen sollten alle Arbeiten – bis auf den Auftrag des Spritzbetons – in 4 h Zeitfenstern erfolgen. Damit sollte erprobt werden, ob das Verfahren auch an Wasserstraßen mit höherem nächtlichen Verkehrsaufkommen anwendbar sein könnte. Um die Gesamtbauzeit nicht unnötig zu verlängern, wurden für eine Nacht zwei 4 h Zeitfenster zugelassen, die aber durch das Räumen der Baustelle und das Aus- und wieder Einfahren des Pontons voneinander zu trennen waren, um so einen 4 h Baubetrieb zu simulieren.

3 Ablauf der Instandsetzungsmaßnahme

3.1 Baustelleneinrichtung

Die Arbeiten begannen im September 2002 mit der Einrichtung der Baustelle. Die zur Ausführung der Arbeiten benötigte Baustelleneinrichtung bestand im wesentlichen aus folgenden Geräten (Bild 4).



Bild 4: Arbeitsponton mit Geräten

- Arbeitsponton 20,0 m x 9,0 m (bestehend aus drei Teilen à 20,0 m x 3,0 m) mit Baggermatten aus Kantelementen und Schuttwanne aus Stahlblech,
- Arbeitsboot,
- Hydraulikbagger Cat 312 mit Greifer oder Walzenfräse,
- Hydraulikbagger Cat 307 mit Meißel,
- Lader,
- 2 Zementsilos,
- Spritzanlage (Zementbunker, Vorlaufmischer, Spritzmaschine, 2 Tanks für Zugabemittel),
- Kompressor,
- Sandstrahleinrichtung,
- Bohrhämmer, Zwangsmischer, Mörtelmischer,
- Wohn-, Sanitär-, Aufenthalts- und Materialcontainer.

3.2 Betonabtrag

Der Abtrag des Altbetons erfolgte mit Hilfe von Walzenfräse und Meißel. Geräteträger waren zwei Hydraulikbagger vom Typ Caterpillar 312B und 307B. Die anfänglich verwendete Tellerfräse wurde nach zwei Tagen durch eine Walzenfräse ersetzt (Bild 5), da sie erhebliche Schwierigkeiten hatte, die harte Deckschicht (Torkret-Schicht) des Altbetons abzutragen.



Bild 5: Teller- und Walzenfräse

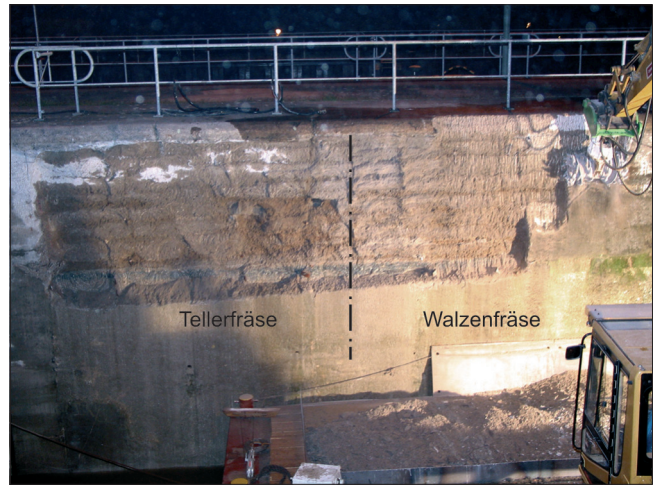


Bild 6: Anordnung der Schuttwanne, Fräsbild Teller- und Walzenfräse

Die Walzenfräse war in der Lage, die harte Deckschicht abzuheben und erreichte eine Fräsleistung von ca. $4 \text{ m}^2/\text{h}$, wobei eine ebenmäßigere Oberfläche erzielt wurde.

Der Hydraulikmeißel erwies sich im Bereich der Leiternische und der Nischenpoller wegen der dort vorhandenen besseren Betonqualitäten und der massiven Bewehrung (z. T. $\text{Ø } 28 \text{ mm}$) als unverzichtbar. Er wurde allerdings erst eingesetzt, nachdem ergebnislos versucht worden war, den obersten Poller mittels Presslufthammer und Fräse abzubrechen. Mit dem Hydraulikmeißel konnten die alten Poller aus Gussstahl durchweg ohne Probleme zerschlagen und anschließend die Anker sowie die umgebende Bewehrung abgebrannt werden.

Zur Aufnahme des herabfallenden Schutts war auf dem Ponton eine Schuttwanne aus Stahlblech in den Abmessungen $12 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ hergestellt worden, deren eine Längsseite mit der Bordwand des Pontons abschloss (Bild 6). An dieser Seite besaß die Schuttwanne keine Seitenwand, sondern einen Fußanschlag aus aufgeschweißten Bewehrungsstählen, der die sog. „Schuttfangbleche“ ($3,0 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$) stützen sollte. Diese wurden in den Fußanschlag eingestellt und gegen die Wand gelehnt, sodass sie das entlang der Wand herabfallende Fräsgut in die Schuttwanne abwiesen. Es sammelte sich vor dem Fuß der Schuttfangbleche am Rand der Schuttwanne. Mit dem Fräskopf konnte es dann in der Schuttwanne verteilt werden, zeitraubende Handarbeit mit der Schaufel war aber immer erforderlich.

3.3 Anker und Bewehrung

3.3.1 Bemessung der Spritzbetonvorsatzschale

Die 25 cm starke Vorsatzschale wurde gemäß den Anforderungen der ZTV-W LB 219 [3] auf den vollen Spaltwasserdruck bemessen. Der Lastfall Spaltwasserdruck wurde für die Anker und der Lastfall Zwang für Biegebemessung zu Grunde gelegt. Für die Vorsatzschale wurde bei einer Betondeckung von 6 cm eine zweilagige, kreuzweise Bewehrung mit Stabstahl $\text{Ø } 16 \text{ mm}$, $a = 12,5 \text{ cm}$, berechnet. Die notwendigen Übergreifungsstöße an den Teilflächengrenzen wurden mit 56 cm berechnet.

3.3.2 Anker Ausbildung und -einbau

Gemäß der statischen Berechnung [1] musste eine Verankerung der Vorsatzschale über Stabanker in den Altbeton erfolgen. Um ein Schwingen der Bewehrung beim Spritzen zu vermeiden, wurden nach DIN 18551 vier Anker je m^2 Wandfläche vorgesehen. Die planmäßige Einbindetiefe der Anker in den Altbeton wurde über Zugversuche auf 65 cm festgelegt (die Prüfung erfolgte auf Verbundspannung sowie Materialversagen). Die Anker waren um 15° abwärts gegen die Horizontale geneigt einzubauen und zur Aufnahme der Verankerungskräfte hakenförmig abzubiegen.

Die Bohrungen zur Aufnahme der Stabanker wurden in einem Raster von $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ mit Bohrhämmern auf einen Durchmesser von 30 mm gebohrt (Bild 7). Wegen



Bild 7: Ankereinbau

der schwankenden Abtragstiefe variiert die Einbindetiefe der Anker zwischen 50 cm und 65 cm. Darin ist ein Vorhaltemaß von 10 cm bis 15 cm enthalten. Trotz der niedrigen Qualität des Altbetons und der Wasserwegigkeit der Kammerwand trat eine Wasserführung nur bei einem sehr geringen Anteil der insgesamt ca. 660 Bohrlöcher auf. Die fertigen Bohrungen wurden anschließend zur Reinigung von losen Bestandteilen und Bohrmehl mit Druckluft gründlich ausgeblasen.

Unmittelbar darauf folgte die Verfüllung der Bohrlöcher mit Ankermörtel. Die vollständige Füllung der Bohrlöcher wurde erreicht, indem der Mörtelschlauch bis auf den Boden der Bohrlöcher vorgeschoben und dann langsam wieder gezogen wurde. Nachfolgend wurden die Stabanker eingesetzt und an vorher gespannten Richtschnüren ausgerichtet. Auf der Höhe jeder Ankerlage wurde eine Richtschnur in der Flucht mit den Wandflächen der angrenzenden Kammerwandblöcke angebracht. Anhand der damit vorgegebenen Lage der fertigen Wandoberfläche wurden die Anker so tief in die Bohrlöcher eingesetzt, dass die angestrebte Betondeckung von 6 cm gewährleistet wurde. Es wurde ein schnell erhärtender Ankermörtel verwendet, der schon ca. 1 h nach Setzen der Anker den Einbau der hinteren Bewehrungslage zuließ.

Innerhalb einer 8 h Schicht konnten bei reibungslosem Ablauf mit fünf Personen auf ca. 30 m² Kammerwand die Bohrlöcher hergestellt, die Anker eingebaut und die hintere Bewehrungslage verlegt werden.

3.3.3 Bewehrungseinbau

Für den Einbau der hinteren Bewehrungslage wurde auf jeder Ankerlage ein horizontaler Bewehrungsstab angerödelt und drei weitere lose abgelegt. An den befestigten horizontalen Stäben konnten die vertikal verlaufenden Bewehrungsseisen angebinden werden, an denen wiederum die noch losen horizontalen Bewehrungsstäbe fixiert werden konnten (Bild 8). Dieses Vorgehen war zwingend, da ein späteres Einfädeln der horizontalen Stäbe hinter die vertikal verlaufenden Stäbe nicht möglich gewesen wäre. In den Überlappungsbereichen der Bewehrung war darauf zu achten, die horizontal verlaufenden Stäbe hinter die vertikale Bewehrung einzufädeln, bevor dies durch das Setzen neuer Anker unnötig erschwert würde.



Bild 8: Bewehrungseinbau

Die vordere Bewehrungslage wurde unmittelbar nach Abschluss des Einbaus der ersten Lage Spritzbeton verlegt. Der Zeitbedarf war i. A. etwas geringer, da die horizontalen Stäbe in der vorderen Bewehrungslage nicht hinter, sondern vor den vertikalen Stäben zu liegen kamen. Dies erleichterte die Verlegung.

3.4 Herstellung und Einbau des Spritzbetons

3.4.1 Spritzbetonanlage

Die Maschinenteknik zur Verarbeitung der schnell abbindenden Spritzbetongemische wurde so ausgewählt, dass sie das Material mit gleichmäßiger Zusammensetzung über den Verarbeitungszeitraum hinweg fördern konnte. Die eingesetzte Spritzbeton-Technik bestand im Wesentlichen aus einer Trockenspritzmaschine, einer Vorbefeuchtungs-Durchlaufmischer-Anlage, dem



Bild 9: Spritzbetonanlage auf dem Arbeitsponton

Vorlagesilo, den Vorlagebehältern für Zusatzmittel und Wasser und der Steuerung (Bild 9).

Das Vorlagesilo und die beiden Vorlagebehälter für Zusatzmittel und Wasser wurden während der Vorbereitungsphase zu den Spritzterminen befüllt. Hierzu wurde der Ponton in die erste Schleusenkammer verbracht und dort beladen. Das Trockengemisch wurde aus den beiden Standsilos auf dem Bauhof abgezogen und über einen Teleskopklader in das Vorlagesilo auf dem Ponton gefüllt. Zusätzlich notwendige Mengen wurden in big-bags gefüllt und während der Bearbeitung auf dem Ponton umgeladen. In die Vorlagebehälter wurde Wasser mit definierten Zusatzmittel für die Zugabestellen 1 und 2 abgefüllt.

Während des Spritzvorganges wurde das Trockengemisch vom Vorlagesilo aus kontinuierlich der Vorratskammer der Spritzbetonmaschine zugeführt. Die Zuführung erfolgte über die Vorbefeuchtungs-Durchlaufmischer-Anlage, die zusätzlich die Aufgabe hatte, dass Trockengemisch mit ca. 2 % – 3 % Wasser (Zugabestelle 1) anzureichern. Die Dosierung des Befeuchtungswassers erfolgte automatisch über eine vorein-

gestellte Wassermengenvorgabe. Die Regelung der Vorbefeuchtungsanlage wurde durch permanentes Abgleichen des Soll/Ist Wertes vorgenommen. Zur Vermeidung der Konsistenzveränderung, und damit des w/z-Wertes, wurde im Einlaufhals des Mixers eine Sonde installiert, die bei fehlendem Trockenmaterial-Nachlauf die gesamte Vorbefeuchtungsanlage abschalten konnte. Erst nach Sicherstellung des Trockenmaterial-Zulaufes war es möglich, die Anlage wieder in Betrieb zu nehmen.

Das zum Erhärten des Betons erforderliche Anmachwasser wurde erst an der Spritzdüse zugeführt (Zugabestelle 2). (Bild 10)

3.4.2 Spritzvorgang

Für Spritzbetonarbeiten waren grundsätzlich Zeitfenster von 8 h Dauer vorgesehen, damit nach dem Einbau des Betons, für den 4 h veranschlagt wurden, noch ausreichend Zeit für dessen Aushärtung zur Verfügung stand. Um den Rückprall beim Auftrag des Spritzbetons zu vermindern und das Risiko der Entstehung von Hohlräumen im Schatten von Bewehrungseisen (insbesondere im Stoßbereich) zu minimieren, erfolgte das Spritzen generell in zwei Lagen (Bild 11):

Erste Lage:

Nach dem Einbau der hinteren Bewehrungslage und einer Reinigung der Altbetonoberfläche von losem Material mittels eines Hochdruckreinigers wurde die erste Lage Spritzbeton auf den Altbeton aufgebracht, wobei die hintere Bewehrungslage ganz eingebettet wurde. Das Spritzen erfolgte aus einer Entfernung von ca. 1,5 m in vertikalen Streifen von ca. 1,5 m Breite, die nacheinander von unten nach oben aufgebaut wurden. Kantenschalung wurde lediglich an den Blockfugen verwendet. Eine Nachbearbeitung der ersten Lage Spritzbeton erfolgte nicht, da die Oberfläche vor dem Auftrag der zweiten Lage sandgestrahlt wurde.

Zweite Lage:

Aus Gründen eines optimierten Arbeitsablaufs wurde vor der 8 h Schicht, in deren erster Hälfte die zweiten Lage Spritzbeton aufgebracht werden sollte, der Abbruch für die folgende Lamelle vorgenommen. Dieser musste vorlaufend erbracht werden, damit nach dem Spritzbetonauftrag Bohr- und Ankerarbeiten ausgeführt werden konnten, da Abbrucharbeiten wegen

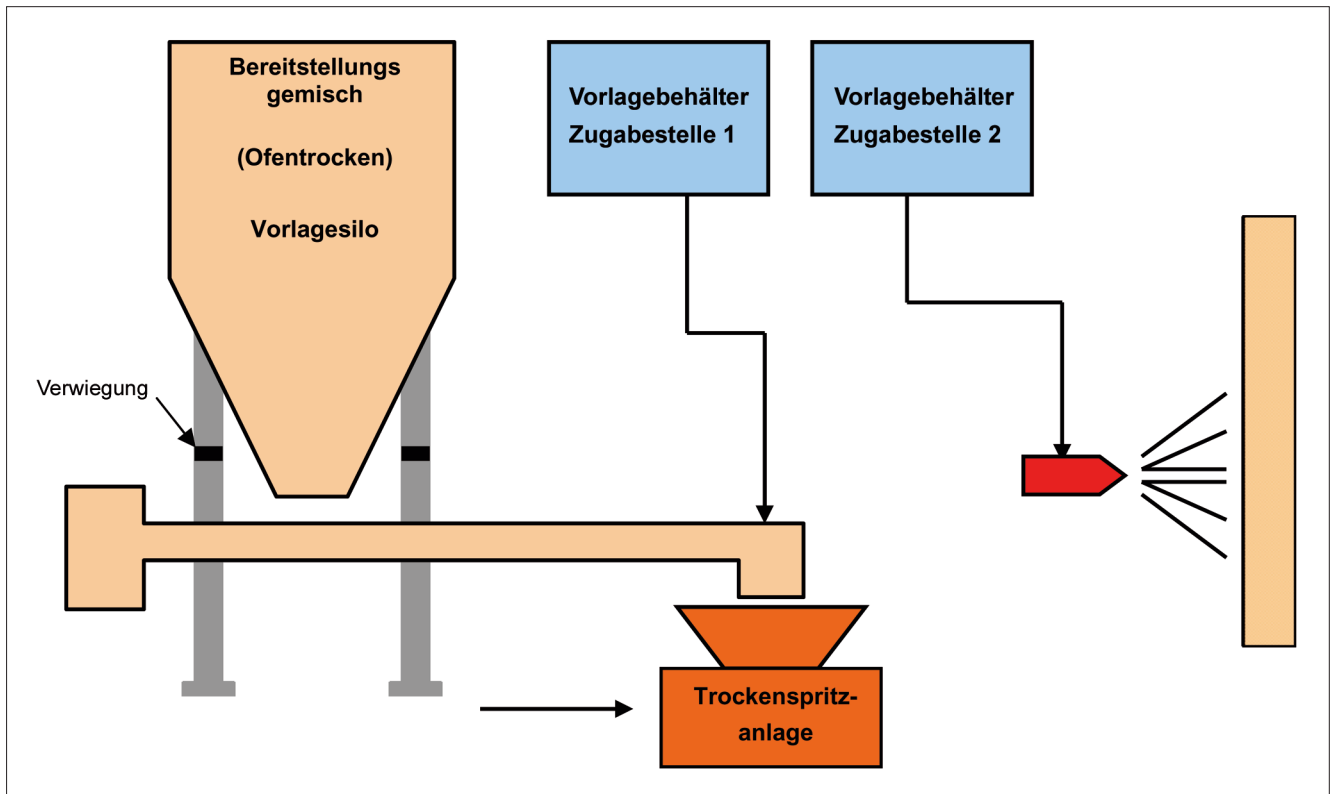


Bild 10: Verfahrensschema Spritzbetonanlage

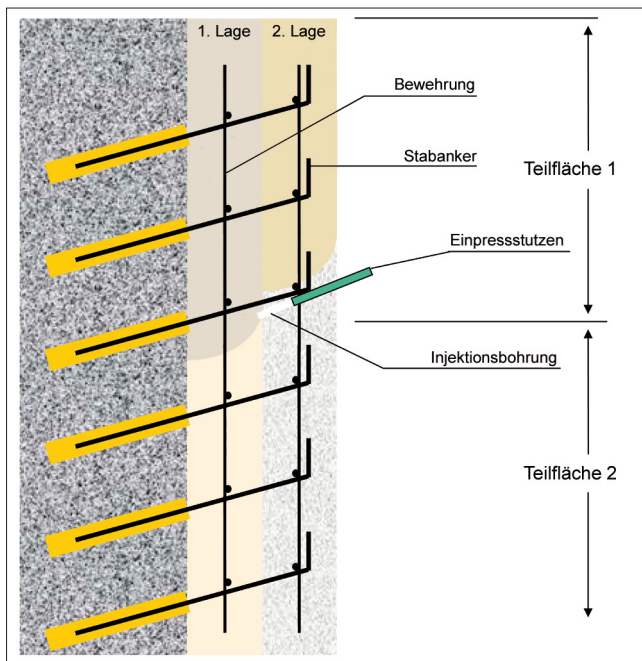


Bild 11: Prinzipdarstellung Spritzvorgang (Schnitt Auftragsschichten)

der damit verbundenen Erschütterungen unterbleiben mussten.

Die zweite Lage Spritzbeton (Bild 12) wurde typischerweise vier bis fünf Tage nach der ersten Lage aufgebracht. Vor dem Spritzen wurde die Oberfläche der



Bild 12: Spritzbetonauftrag 2. Lage

ersten Lage Spritzbeton sandgestrahlt. Außerdem wurden Lehren (Holzlatten) auf der Bewehrung befestigt und in der Flucht der Mauerfront ausgerichtet, die nach dem Auftrag ein ebenes Abreiben des Spritzbetons ermöglichten. In der ersten Lamelle waren diese Lehren vertikal in Abständen von 1,5 m bis 2 m angebracht. Bei den nachfolgenden Lamellen wurde lediglich eine horizontal durchlaufende Lehre am unteren Rand des Spritzbereichs angebracht. Mit Nagelbrettern („Igel“) wurde die Oberfläche nachgearbeitet.

Auf eventuelle Vertiefungen wurde nochmals Spritzbeton aufgetragen und dieser wieder egalisiert. Eine spezielle Nachbehandlung der fertigen Vorsatzschale erfolgte nicht, da der reguläre Schleusenbetrieb außerhalb der Sperrpausen für eine ausreichende Benetzung der Spritzbetonflächen sorgt.

3.5 Einbau von Ausrüstungsteilen

3.5.1 Allgemeines

Für die Ausrüstung wurde die DIN 19703 „Schleusen der Binnenschifffahrtstraßen – Grundsätze für Abmessungen und Ausrüstung“ zu Grunde gelegt. Da die nach DIN vorgesehenen Verankerungen nicht für 25 cm starke Vorsatzschalen geeignet sind, mussten für alle Einbauteile gesonderte Verankerungselemente geplant werden. Sämtliche Einbauteile wurden nach Fertigstellung der Vorsatzschale nachverpresst, um evtl. Hohlräume zu verfüllen.

3.5.2 Steigleitern

Für den Einbau der Steigleitern wurden entsprechend den Anforderungen der DIN 19703 und der Vorsatzschalenstärke bis zu 80 cm tiefe Nischen in die Kammerwände gefräst (Bild 13). Die Rückwand der Leiternische wurde als zweite Spritzbetonschale ausgebildet. Diese hintere Spritzbetonschale überlappte ca. 20 cm mit der vorderen Spritzbetonschale.

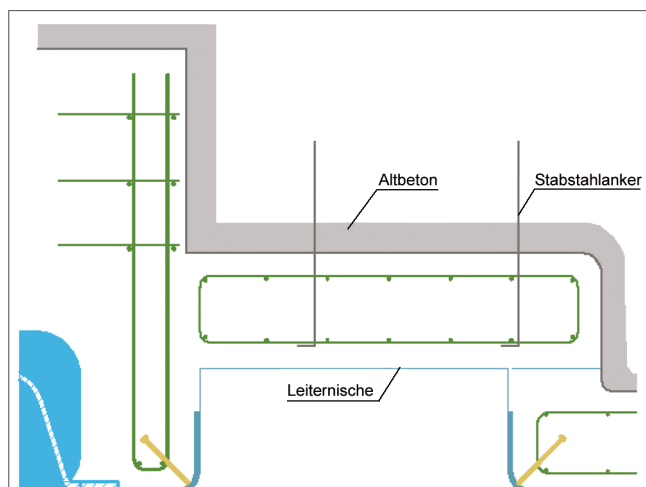


Bild 13: Nischenausbildung für Steigleiter (Systemskizze)

3.5.3 Nischenpoller

Zur Rückverankerung der Nischenpoller wurden verschiedene Varianten berechnet:

- Variante 1: Verankerung der Nischenpoller in Anlehnung an die DIN 19703. Auf Grund der im Rahmen des Betonabtrags festgestellten deutlichen Inhomogenitäten des Betongefüges und des damit bedingten Risikos bei der Ankerbildung und -ausrichtung musste diese Ausführungsvariante jedoch verworfen werden.
- Variante 2: Die Nischenpollergehäuse werden auf einem vorgefertigten Stahlrahmen montiert, und dieser über GEWI-Anker (Traversen) in zwei vertikalen Stahlbetonpfählen verankert (Entwicklung in Zusammenarbeit mit der BAW als Mustervariante für inhomogene gering tragfähige Untergründe). Aus organisatorischen Gründen wurde diese Lösung auf Wunsch des Auftraggebers jedoch nicht ausgeführt.
- Variante 3: Nischenpollerverankerung über einen Betonblock (Bild 14). Es wurde eine durchgehende vertikale Nische von ca. 1,20 m x 1,20 m geschaffen. In ihr wurden zur Aufnahme der anzusetzenden Pollerzugkraft von 200 kN je Poller vier GEWI-Anker (\varnothing 25 mm, L = 2,10 m) in der entsprechenden Höhe 1,50 m tief im Altbeton verankert. Diese wurden durch weitere, den Ankern der Vorsatzschale entsprechende, aber längere Anker ergänzt. In der Nische wurden anschließend um den jeweiligen Poller 3 Lagen Stabstahlbewehrung \varnothing 16 mm kreuzweise (a = 20 cm) eingebaut und an diesem Bewehrungskorb die in DIN 19703 vorgegebenen Flachstahlanker fixiert.

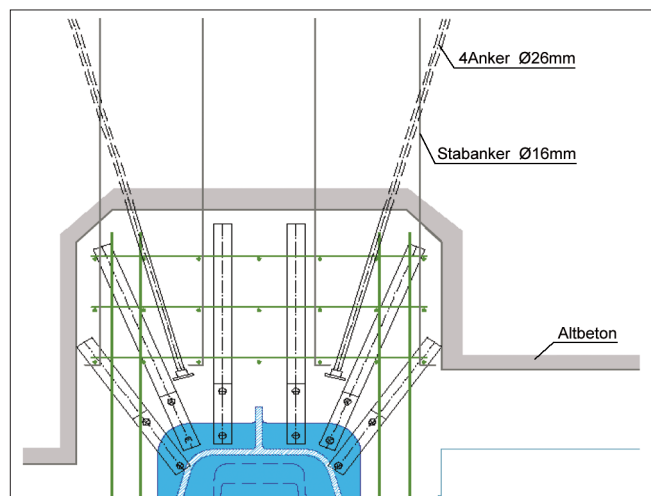


Bild 14: Variante 3: Nischenpollerverankerung über Betonblock (Systemskizze)

Da die Pollergehäuse über eine vertikale und eine horizontale Rippe verfügen, in denen Löcher für die Verschraubung mit den Flachstahlankern vorhanden sind,

mussten die Anker mit hoher Genauigkeit positioniert werden. Dazu war eine Holzschablone mit den Abmessungen eines Pollers angefertigt worden. Im nächsten Schritt wurde in der Nische lagenweise Spritzbeton aufgebaut und, nachdem so ein massiver Stahlbetonblock geschaffen worden war, der Poller mit den Flachstahlankern verschraubt. Laschen aus Flachstahl (L = 20 cm), die zwischen den Ankern und dem Pollergehäuse eingesetzt wurden, gewährleisteten, dass der Poller noch in gewissen Grenzen ausgerichtet werden konnte.

Letzter Schritt des Pollereinbaus war das Hinterfüllen mit Spritzbeton (Bild 15). Die Wandoberfläche um die Poller herum wurde zusammen mit der zweiten Lage Spitzbeton der jeweiligen Lamelle fertiggestellt. Die Einbauarbeiten erfolgten teilweise in kurzen und teilweise in langen Zeitfenstern, wobei lange Zeitfenster nur für den Spritzbetoneinbau zwingend erforderlich sind.



Bild 15: Einbau eines Nischenpollers

3.5.4 Kantenschutz

Außer den Nischenpollern mussten Kantenschutzprofile an der Plattformkante und an den Kanten der Leiternische sowie Blockfugenprofile eingebaut werden. Für den Kantenschutz musste eine Sonderlösung erarbeitet werden, da die Verankerung nach DIN 19703 hier nicht angewendet werden konnte. Die vorhandenen Verankerungen wurden auf die Abmessungen der Vorsatzschale gekürzt bzw. durch Anker mit Kopfausbildung ersetzt.

Zur Aufnahme des Kantenschutzes an der Plattformkante (Bild 16 a) waren die obersten 20 cm der Vorsatzschale beim Spritzbetoneinbau ausgespart wor-

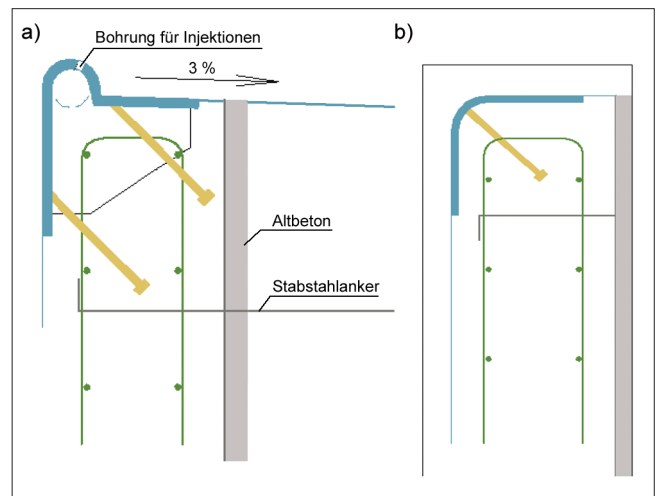


Bild 16: Ausbildung horizontaler (a) und vertikaler (b) Kantenschutz

den. In diese Aussparung wurde der Kantenschutz eingehoben, ausgerichtet und seine Flachstahlanker mit Schweißpunkten an der Bewehrung fixiert. Nach Abschaltung des verbleibenden Spalts zwischen der Unterkante des Profils und der Vorsatzschale wurde die Aussparung ausbetoniert. Die vertikalen Kantenschutzprofile (Bild 16 b) an der Leiternische und die Blockfugenprofile wurden vor dem Einbau der zweiten Spritzbetonlage ebenfalls an der Bewehrung fixiert und beim Auftrag der zweiten Spritzbetonlage hinterfüllt.

3.5.5 Blockfugen

Für die Herstellung der Blockfugen wurden Stahlwinkel (150/10 mm) um 30 mm von der Bauwerksvorderkante zurückgesetzt eingebaut und rückverankert (Bild 17). Hierdurch soll der spätere Einbau eines Klemmfugenbandes gewährleistet werden.

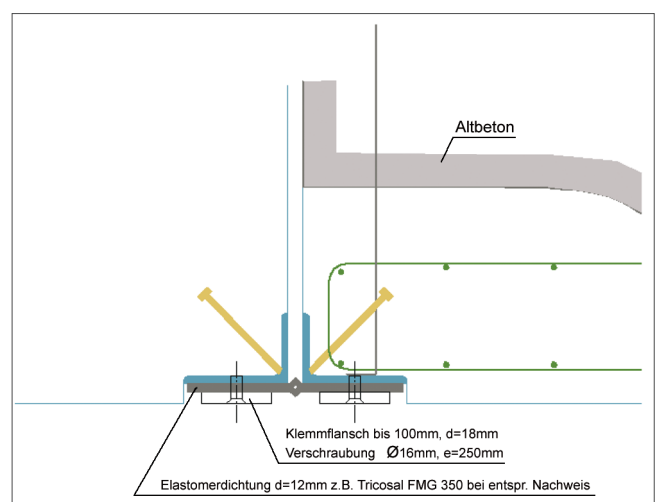


Bild 17: Ausbildung der Blockfuge

Art der Prüfung	Prüfgegenstand/ Prüfkörper	Anforderungen	Häufigkeit
<i>(1) Trockengemisch</i>			
Rückstellprobe	Bereitstellungsgemisch (Silolagerung)	Mindestmenge 15 kg	jede Lieferung
Sieblinie		Einhalten der aufgrund der Eignungsprüfung festgelegten Werte	
<i>(2) Im Mischer hergestellte Betonmischung (einschließlich Zusatzmittel und Wasser)</i>			
Frischbetonrohdicke	je 3 Prismen 4x4x16 cm ³	Einhalten der aufgrund der Eignungsprüfung festgelegten Werte	jede Lieferung
Druckfestigkeit nach 4 h und 28 Tagen, Lagerung und Prüfung gemäß DIN EN 196-1	2 x 3 Prismen 4x4x16 cm ³		

Tabelle 2: Bereitstellungsgemisch (Prüfebene 1)

Art der Prüfung	Prüfgegenstand/ Prüfkörper	Anforderungen	Häufigkeit
Frischbetonrohdicke	Spritzpfanne	Einhalten der aufgrund der Eignungsprüfung festgelegten Werte bzw. Rezeptur	1 x je Arbeitsabschnitt
Druckfestigkeit nach 4 h und 28 Tagen, Lagerung und Prüfung gemäß DIN EN 196-1	2 x 3 Prismen 4x4x16 cm ³		

Tabelle 3: Spritzbeton, Frischbeton (Prüfebene 2)

Art der Prüfung	Prüfgegenstand/ Prüfkörper	Anforderungen	Häufigkeit
Betontemperatur bis 24 Stunden	Temperaturfühler	Vergleich mit den Werten der Eignungsprüfung	1 x je Arbeitsabschnitt
Frühfestigkeit nach 2, 3 und 4 Stunden	Bolzensetzverfahren		
Behindertes Schwinden bis 28 Tage	Schwindrinne	keine Rissbildung (Auswertung gemäß ZTV-W 219, Anhang 4)	
Druckfestigkeit nach 4 h und 28 Tagen gemäß DIN 1048	2 x 3 Bohrkern Ø 100 mm, h/d= 1	nach 4 h: Mittelwert >15 N/mm ² Einzelwerte >12 N/mm ² nach 28 d: ≥ B 35 nach DIN 1045	
Wasserundurchlässigkeit nach 28 Tagen gemäß DIN 1048-5	3 Bohrkern Ø 150 mm, h= 100 mm	Wassereindringtiefe < 30 mm	1 x jeden zweiten Arbeitsabschnitt

Tabelle 4: Spritzbeton, Festbeton (Prüfebene 3)

des Schwindens erfolgte nach ZTV-W LB 219 sowie zusätzlich unter projektangepassten Bedingungen mit einer Wechsellagerung feucht/trocken. Das Ergebnis ist in Bild 19 dargestellt.

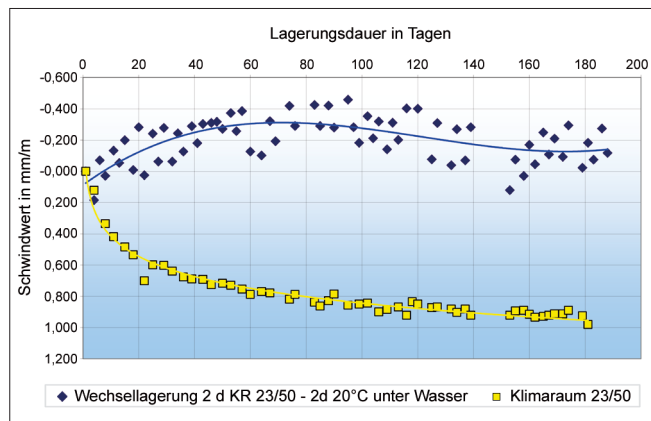


Bild 19: Schwindverhalten des Spritzbetons

Es zeigte sich, dass unter Betriebsbedingungen mit zyklisch wechselnden Wasserständen das Schwinden stark vermindert ist, sodass gegenüber einer konventionellen Instandsetzung im Hochbau theoretisch geringere Schwindrissbildungen zu erwarten sind.

3.8 Emissionen während der Baumaßnahme

3.8.1 Staubemissionen

Staub entstand hauptsächlich bei den Abbrucharbeiten und beim Beladen des Zementbunkers mit Trockengemisch. Während des Fräsens und Meißelns wurde über dem jeweiligen Arbeitsort aus einem Wasserschlauch Sprühnebel verteilt, der die Staubentwicklung reduzierte und die Sicht für den Maschinenführer verbesserte. Auch ohne diese Maßnahme blieb die Staubausbreitung aber auf das unmittelbare Umfeld der Baustelle beschränkt.

3.8.2 Lärmemissionen

Von den Emissionen der Baustelle war allein Lärm relevant, der allerdings bei fast allen Arbeitsschritten entstand. Der Lärmpegel in der Umgebung der Schleuse wurde durch das mit der Dokumentation der Maßnahme beauftragte Ingenieurbüro an vorher festgelegten Punkten stichprobenartig für die verschiedenen Tätigkeiten gemessen. In Ergänzung dazu wurden vom Bauaufseher mit dem gleichen Messgerät zusätzliche Daten über die Lärmausbreitung erhoben.

Unter den Routinetätigkeiten verursachte das Sandstrahlen, gefolgt von Hydraulikmeißeln, Fräsen mit der Walzenfräse, Bohren mit Pressluft- und Elektrobohrhämmern sowie Spritzbetonauftrag die höchsten Schallpegel. Auf der Schleusenplattform (direkt über dem Entstehungsort) wurden die in Tabelle 5 dargestellten maximalen Schallpegel gemessen.

Tätigkeit	Schallpegel
Sandstrahlen	107 dB(A)
Hydraulikmeißel	96 dB(A)
Fräsen mit der Walzenfräse	85 dB(A)
Bohren mit Pressluft- und Elektrobohrhämmern	80 dB(A)
Spritzbetonauftrag	77 dB(A)
Hintergrundpegel	52 dB(A)
(Zugdurchfahrt Bahnbrücke Unterhaupt)	(74 dB(A))

Tabelle 5: Gemessene Schallpegel

Die Lärmemissionen in der Umgebung waren so gering, dass für den Einsatz des erprobten Instandsetzungsverfahrens auch in der Nähe von Wohnbebauung keine Einschränkungen bestehen.

4 Probleme und Verbesserungspotenziale

4.1 Vorerkundung und Instandsetzungsplanung

Ein Instandsetzungsobjekt muss grundsätzlich eingehend erkundet werden, um seine Beschaffenheit im Hinblick auf Betonqualität, Bewehrungsgehalt, Wasserführung der Wand usw. umfassend zu ermitteln. Die Ergebnisse müssen in die Planung des Bauablaufes einfließen.

Im vorliegenden Fall wurde die rückseitige Durchfeuchtung bzw. Durchströmung des Altbetons planmäßig berücksichtigt. Zur Verdeutlichung zeigt Bild 20 den sehr schlechten Zustand des Nachbarblocks. Das von hinten anstehende Wasser entweicht hier im unteren Bereich der Blockfuge als dicker Strahl.

Das primäre Ziel der Probemaßnahme bestand darin, die Machbarkeit des Konzeptes „schnell erhärtende Spritzbetonvorsatzschale“ nachzuweisen. Unter diesem Aspekt wurde für den Instandsetzungsbereich bewusst auf die Abdichtung des Untergrundbetons verzichtet. Gemäß geltendem Regelwerk (DIN 18551)



Bild 20: Wasserdurchtritt infolge rückseitiger Durchfeuchtung

ist ein Auftrag von Spritzbeton auf wasserführende Untergründe nicht zulässig. Bei zukünftigen Baumaßnahmen muss bei solchen Bedingungen eine vorherige Abdichtung – vorzugsweise durch Injektionen mit hydraulischem Bindemittel nach DWA Merkblatt M 506 [4] – erfolgen. Derartige Injektionen können über Vertikalbohrungen von der Kammerwandplattform aus durchgeführt werden und stören den Schiffsverkehr kaum.

Die Ergebnisse der Vorerkundung müssen insbesondere auch in die Wahl der Abbruchgeräte einfließen. Im vorliegenden Fall waren sehr inhomogene Untergründe zu berücksichtigen, die zudem auch noch unplanmäßige Bewehrungsanteile enthielten.

Grundsätzlich sollten bereits im Rahmen der Planung alle Abläufe und insbesondere technischen Einzelheiten (z. B. nicht normativ geregelte Sonderlösungen wie das System der Pollerverankerung) frühzeitig festgelegt werden, um später während des Bauablaufs Stillstände und Verzögerungen zu vermeiden.

4.2 Witterungsbedingte Unterbrechungen

Wegen des hohen Wasserstandes im Unterwasser der Schleuse mussten die Arbeiten drei Mal für mehrere Wochen eingestellt werden. Für die Jahreszeit außergewöhnlich hohe Wasserstände des Rheins machten die weitere Bearbeitung unmöglich (Bild 21). Hinzu kamen Unterbrechungen wegen niedriger Temperaturen, bei welchen das Verarbeiten von Spritzbeton nicht zulässig ist.



Bild 21: Hochwasserlage im November (Dauer 2 1/2 Wochen)

4.3 Baustelleneinrichtung

4.3.1 Arbeitsponton

Der Ponton wurde an den vorhandenen Pollern mit Drahtseilen über Winden belegt. Bei den Abbrucharbeiten wirkten erhebliche Kräfte auf den Ponton, die bei ungünstiger Stellung des Pontons zu den Pollern oder ungünstiger Führung der Drahtseile zu starken Bewegungen des Pontons führten. Daher variierte die Stabilität je nach Lage des Pontons. Insbesondere bei gleichzeitiger Arbeit mit Fräse und Meißel bewegte sich der Ponton erheblich, was das Ansetzen und Führen der beiden Geräte deutlich erschwerte. Bei Einsatz eines Stelzenpontons (nur in Schleusen mit relativ geringen Hubhöhen) würden die Bewegungen des Pontons beim Abbruch deutlich reduziert. Diese Variante war hier allerdings nicht möglich, da die Einfahrtshöhe bei hochgefahrenen Stützen zu gering gewesen wäre. Außerdem wäre eine Abstützung gegen die andere Kammerwand möglich.

Bei der Instandsetzung einer ganzen Schleusenammer sollte überlegt werden, ob ein Ponton allein für den Abbruch bereitgestellt werden sollte. Die Abbruchgeräte könnten dann u. U. die gesamte Blocklänge bearbeiten, ohne dass der Ponton verholt werden müsste. Außerdem könnte Schutt in größeren Mengen auf dem Ponton gelagert werden, da keine anderen Arbeiten dadurch behindert würden.

4.3.2 Schuttfangwanne und -bleche

Grundsätzlich war diese Einrichtung zweckmäßig und in der Lage, den größten Teil des Fräsguts aufzufangen. Allerdings fielen mehrere Schuttfangbleche in die Schleusenammer und gingen verloren, die Ursache hierfür waren zumeist Bewegungen des Pontons. In den Nischen für Poller und Steigeleiter war die Wirkung der Bleche reduziert, da ein spaltfreies Aufstellen der Schuttfangbleche nicht möglich war.

Das Räumen des sich vor den Schuttfangblechen sammelnden Schutts erfolgte zu einem guten Teil von Hand und war zeitintensiv. Dies verkürzte die effektive Arbeitszeit in der Kammer. Die Schuttwanne war außerdem zu knapp dimensioniert, was zeitintensives Umlagern des Schutts bedingte.

Beim Meißeln an Pollern und Leiternische fielen mehrere größere Betonbrocken (der Größte maß ca. 50 cm x 30 cm x 20 cm) in die Schleusenammer, da die Schuttfangbleche nicht ausreichend stabil waren, um ihrem Aufprall zu widerstehen. Es wurde versucht, die Schuttfangbleche mit starken Scharnieren an der Schuttwanne zu befestigen, jedoch hielten auch diese den Belastungen nicht lange stand.

Die Schuttfangbleche wären wesentlich massiver auszuführen oder durch ein anderes System zu ersetzen. Denkbar wäre, von der Plattform aus einen über den gesamten Kammerwandblock durchgehenden Träger an Seilen oder Ketten unter den zu bearbeitenden Abschnitt der Kammerwand zu hängen. Auf diesem Träger müssten Abweisbleche montiert sein, die das herabfallende Abbruchmaterial auf den Ponton leiten (Bild 22).

4.3.3 Spritzanlage und Materialbevorratung

Das Vorlagesilo, in dem das Trockengemisch für die Spritzbetonzubereitung auf dem Ponton vorgehalten und aus dem es direkt in den Vorlaufmischer gefördert wurde, wies Schwachstellen auf:

- Der Außenrüttler, mit dem ein gleichmäßiges Nachrutschen des Materials erzielt werden sollte, war anfänglich nicht leistungsfähig genug und versagte zeitweise. Dies führte mehrmals zu längeren Unterbrechungen des Spritzbetoneinbaus, da nicht mehr genug Trockengemisch in den Vorlaufmischer gelangte. Ein später angebrachter zweiter Rüttler

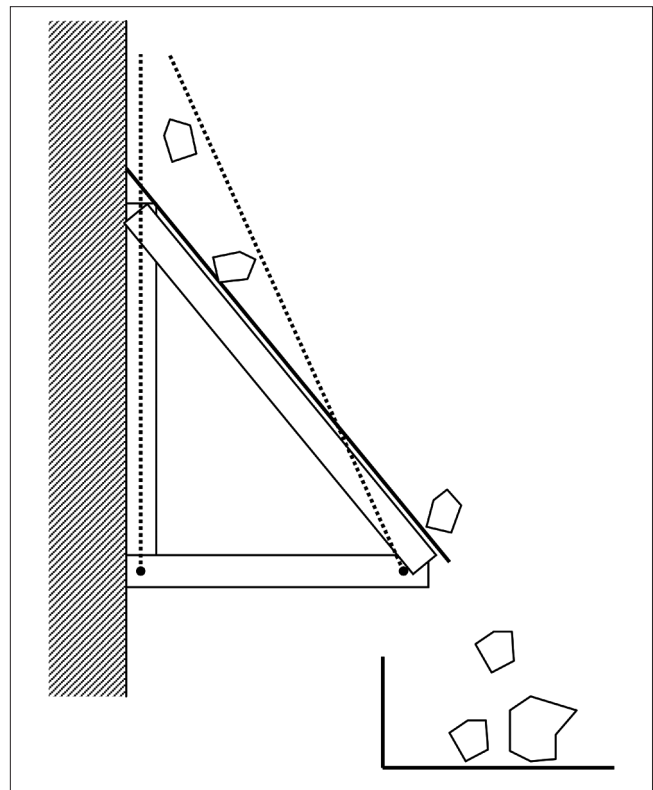


Bild 22: Konstruktionsvorschlag Schuttfangblech

verbesserter die Situation zwar, konnte aber das zeitweise Stocken des Materialflusses auch nicht ganz verhindern.

- Ein weiterer Schwachpunkt des Vorlagesilos war die Art und Weise seiner Befüllung. Das Trockengemisch wurde aus den beiden Standsilos in die Schaufel des Radladers verladen, an die Liegestelle des Pontons gefahren und dort in das Vorlagesilo eingefüllt. Dies war zeitintensiv und bei feuchter Witterung musste penibel darauf geachtet werden, dass kein Regen auf die Trockenmischung fiel, was sonst zu Verklumpungen geführt hätte. Außerdem kam es beim Einfüllen in das Vorlagesilo zu starker Staubentwicklung.
- Die Abdeckung des Vorlagesilos mit Kunststoffplanen war nicht ausreichend wasserundurchlässig. Zwar schützten die Planen weitgehend vor Regen, nicht jedoch vor Luftzutritt, sodass nach längeren Standzeiten das Trockengemisch teilweise ausgehärtet war. Mehrmals musste das Vorlagesilo mittels Presslufthammer geräumt werden.
- Das Vorlagesilo sollte ein größeres Fassungsvermögen haben, absolut wasserdicht sein und über Leitungen oder ein überdachtes Förderband befüllt werden können. Die gesamte Transportkette der

trockenen Betonmischung vom Standsilo in das Vorlagesilo muss für alle Witterungsverhältnisse vollständig vor dem Zutritt von Feuchtigkeit geschützt sein. Eine stärkere Neigung des Bunkerbodens und leistungsfähigere Außenrüttler wären wünschenswert.

Grundsätzlich sollte bei späteren Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit eine zweite Spritzbetonanlage inkl. Steuerung vorgehalten werden. Dies ist bei Anordnung auf der Schleusenplattform unproblematisch zu realisieren, eine zweite Anlage auf einem Ponton vorzuhalten war im Rahmen einer Probemaßnahme aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

4.4 Betonabtrag

4.4.1 Abtrag Wandflächen

Ursprünglich war angenommen worden, dass der Stampfbeton der Schleusenammerwand keine Bewehrungsstäbe enthält. Während der Abbrucharbeiten wurden jedoch flächendeckend senkrecht zur Kammerwand angeordnete Stabstäbe in einer Dichte von 4 St/m² angetroffen (Bild 23). Wegen ihrer relativ geringen Einbindetiefe konnten diese Stabstäbe von der Walzenfräse aus der Wand gerissen werden. Trotzdem verminderten sie die Abbruchleistung merklich, da sie von der Fräse nach dem Freilegen zunächst nach unten über den Altbeton gedrückt wurden und diesen vor dem Angriff des Fräskopfs schützten, bis sie vollständig entfernt waren.



Bild 23: Bewehrungseisen im Altbeton

Neben diesen Stabstäben wurden in mehreren Horizonten auch Bandstäbe (80 mm x 10 mm) freigelegt.

Da sie offensichtlich tiefer in die Wand einbanden und nicht herausgerissen werden konnten, musste der Altbeton um sie herum abgefräst werden, bevor sie mit dem Trennschleifer gekappt werden konnten. Es wird vermutet, dass alle angetroffenen Stähle während des Baus der Schleuse zur Befestigung von Schalungselementen dienten.

Die Auswahl des Fräswerkzeuges muss den jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Die anfänglich verwendete Tellerfräse (Fräsleistung nur ca. 1,7 m²/h) wurde auf Grund der Stahleinschlüsse nach drei Tagen durch eine Walzenfräse ersetzt. Mit der Walzenfräse wurde eine Fräsleistung von ca. 4,0 m²/h erreicht und zudem eine ebenmäßigere Oberfläche erzielt.

4.4.2 Abtrag Nischen

Im Bereich der Leiternische und der Nischenpoller erwies sich der Einsatz eines Hydraulikmeißels wegen der besseren Betonqualitäten und der massiven Bewehrung (teilweise Ø 28 mm) als sehr vorteilhaft. Die alten Poller konnten zerschlagen, die Bewehrung anschließend abgebrannt werden. Ein Abbruch mittels Presslufthammer und Fräse zeigte sich als zu zeitaufwändig.

4.4.3 Einbau der Anker und Bewehrung

Das Bohren von Hand ist aufwändig, bei Ausführung einer Gesamtmaßnahme wäre der Einsatz einer Bohrlafette am Ausleger eines kleinen Hydraulikbaggers effizienter.

4.5 Schnell erhärtender Spritzbeton

4.5.1 Einbau und Nachbehandlung

Auf Grund der geforderten Eigenschaften (hohe Frühfestigkeit) verlangte der Umgang mit dem Trockengemisch höchste Sensibilität der Verarbeiter hinsichtlich Kontinuität der Bearbeitung und schnellste Beseitigung von Störungen. Von der Anlagentechnik wird eine kontinuierliche Materialförderung verlangt. Störungen ergaben sich während der Einarbeitungszeit und hatten neben Verstopfern der Förderschnecke zum Teil ein Abbinden des Spritzbetons im Mischer zur Folge. Durch Modifikation der Steuerungstechnik wurden diese Störungen beseitigt.

Hinter den zur Erzielung einer ebenen Oberfläche eingebauten Lehren entstanden beim Spritzen Hohlräume, die nach dem Entfernen der Lehren in Handarbeit von losem Material gereinigt werden mussten, bevor die durch die Lehre entstandene Nische zugespritzt werden konnte. Diese Demontage der Lehren muss schnellstmöglich erfolgen, um ein „zusammenwachsen“ der Spritzbetonschichten zu gewährleisten.

Das Abreiben („Abigeln“) der gespritzten Betonoberfläche kann wegen des schnellen Abbindens des Spritzbetons nur innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums erfolgen, hier besteht erhöhter Personalbedarf (Bild 24). Um eine ebene Fläche zu erhalten war es häufig notwendig, auf Fehlstellen nach dem Abigeln eine zusätzliche Spritzbetonschicht aufzubringen und die Oberfläche erneut zu glätten. Hierdurch könnten sich Fehlstellen entwickeln; durch den Auftrag eines Übermaßes, das durch das Abigeln reduziert wird, können diese Fehlstellen vermieden werden.

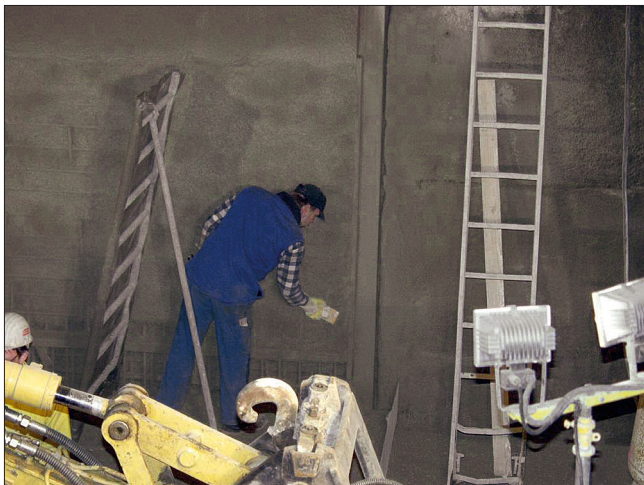


Bild 24: Abreiben der fertigen Flächen („Abigeln“)

Da der reguläre Schleusenbetrieb außerhalb der Sperrpausen für eine ausreichende Benetzung der Spritzbetonflächen sorgt, wurden für die Instandsetzung zwischen Unterwasser und Oberwasser keine besonderen Maßnahmen zur Nachbehandlung durchgeführt. Es wird jedoch empfohlen, während der Ruhepausen bis zum nächsten Schleusenvorgang das Kammerwasser stets auf Oberwasserspiegel zu halten. Der Bereich oberhalb des OW bis zur Kammerplattform muss in jedem Fall einer Nachbehandlung gemäß ZTV-W LB 219 unterzogen werden.

Die Übergänge der Teilflächen wurden ohne Verpressschläuche oder andere Fugenausbildungen hergestellt. Es zeigten sich an einigen der Übergänge Durchfeuchtungen, die später durch Injektionen verschlossen wurden. Bei Gefahr rückseitiger Durchfeuchtung wird empfohlen, bei späteren Baumaßnahmen direkt in die Anschlussfuge einen Verpressschlauch einzulegen.

4.5.2 Qualität der fertigen Flächen

In der vierten Lamelle entwickelten sich bereits kurz nach ihrer Fertigstellung deutliche Risse über die gesamte Fläche (Bild 25). Ursache für diese intensive Rissbildung war der Einbau des Spritzbetons bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen nahe -5°C . Die Lufttemperatur beim Einbau sollte daher zukünftig auch bei dem unter Wärmeentwicklung sehr schnell erhärtendem Material 0°C nicht unterschreiten.



Bild 25: Rissbildungen Lamelle 4

Auf Grund der Rissbildungen wurde entschieden, die zweite Lage Spritzbeton mittels Höchstdruckwasserstrahl (HDW) abzubrechen und zu erneuern. Der Abbruch im Höchstdruckwasserstrahlverfahren wurde von einer Spezialfirma an einem Tag ausgeführt (Bild 26). Am folgenden Tag wurden insbesondere die Übergangflächen zu den angrenzenden Lamellen von Hand nachbearbeitet, die gesamte Lamelle sandgestrahlt und Spritzbeton aufgetragen. Eine erneute Rissbildung trat nicht auf.



Bild 26: Abbruch der vierten Lamelle mittels HDW



Bild 27: Ansicht nach Fertigstellung

5 Bewertung der Dauerhaftigkeit

5.1 Augenscheinliche Bewertung

Nach fünf Jahren Nutzungsdauer erfolgte eine augenscheinliche Bewertung des instand gesetzten Kammerwandblocks. Dafür wurden die Flächen vorher mit einem Hochdruckreiniger von Bewuchs und Ablagerungen befreit. Wie die Bilder 27 und 28 im Vergleich zeigen, traten an der Betonoberfläche gegenüber dem Bauzustand – abgesehen von schwachen Aussinterungen in ehemals durchfeuchteten Bereichen – augenscheinlich keinerlei Veränderungen auf. Weder anhand von Rissbildungen, noch anhand etwaiger Abwitterungen wurden Hinweise auf eine mangelnde Dauerhaftigkeit gefunden. Auch die durch Frostangriff und Schiffsreibung am stärksten belasteten Bereiche (OW-Linie) zeigten keinerlei Auffälligkeiten.

Wie bereits ausgeführt, waren Durchfeuchtungen im Bauzustand und unmittelbar danach nicht vermeidbar, da die Vorsatzschale aus Spritzbeton – entgegen den zulässigen Regelwerken – direkt auf einen Wasser führenden Untergrund aufgebracht wurde. Obwohl die Flächen dadurch kaum beeinträchtigt sind, führte dies – insbesondere im unteren Abschnitt (hoher Wasserdruck) – zu unschönen Aussinterungen im Anschlussbereich zu den Stahleinbauteilen.

Es ist davon auszugehen, dass die Durchfeuchtungen und Aussinterungen bei einer Abdichtung des Untergrundbetons (vor Auftrag des Spritzbetons) nicht aufgetreten wären. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Betons stellen sie keinen Mangel dar, vielmehr erfolgte



Bild 28: Ansicht nach 5 Jahren Nutzung

durch die Aussinterung von Kalziumhydroxid eine Abdichtung der ehemals durchfeuchteten Bereiche.

5.2 Materialprüfungen

Um die Dauerhaftigkeit und die Materialeigenschaften des schnell erhärtenden Spritzbetons nach den ersten fünf Jahren Nutzungsdauer direkt bewerten zu können, wurden im März 2008 an ausgewählten Stellen Bohrkerne $\varnothing 80$ mm bis zu einer Tiefe von 250 mm aus der Spritzbetonvorsatzschale entnommen. Im Baustofflabor der BAW wurden an diesen Proben verschiedene Kennwerte geprüft. Die nachfolgende Bewertung der Prüfergebnisse erfolgt im Vergleich zu den Ergebnissen der Eignungsuntersuchungen sowie der bei der Herstellung durchgeführten Qualitätssicherung und kann wie folgt zusammengefasst werden:

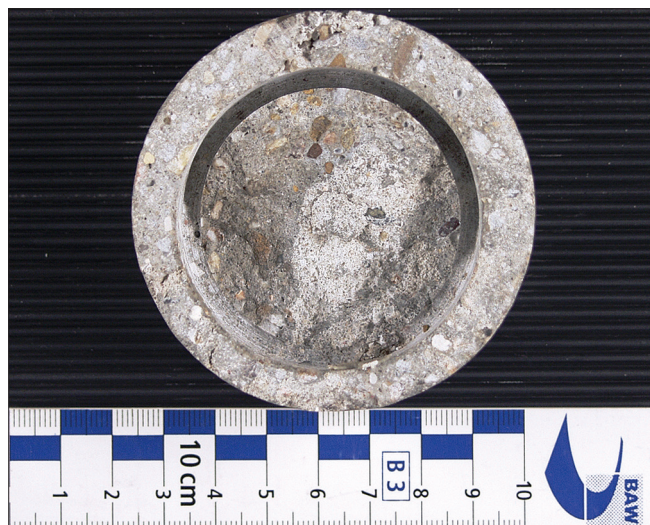


Bild 29: Aussinterung in der Abrissfläche einer Abreißfestigkeitsprobe (6 cm Tiefe)

Der statische E-Modul liegt nach fünf Jahren zwischen 32 und 38 kN/mm², die mittlere Druckfestigkeit beträgt 60 ± 12 N/mm². Die geplante Festigkeitsklasse (B35 bzw. C30/37) wurde damit am Bauwerk sicher nachgewiesen, aktuell entspricht der Beton gemäß DIN EN 13791 einer Festigkeitsklasse C40/50. Festigkeitsminderungen wurden nicht festgestellt.

Mittels tiefengestaffelter Abreißfestigkeitsprüfungen bis in Höhe der ersten Bewehrungslage konnte bei Werten zwischen 8,1 N/mm² und 4,5 N/mm² nachgewiesen werden, dass in diesem oberflächennahen Bereich (Expositionsklasse XF3) keine inneren Gefügeschäden durch Frost verursacht wurden. Bei einer Vergleichsprobe aus einem bereits zur Bauzeit augenscheinlich gerissenen Bereich (siehe Bild 29) wurde eine etwas geringere Abreißfestigkeit von 3,7 N/mm² ermittelt. Aussinterungen in der Abrissfläche bestätigen

die schon längere Zeit vorhandenen Verbundstörungen. Mit Ausnahme dieser Fehlstelle erreichte und überstieg die Abreißfestigkeit jedoch an allen Stellen den bei der vorhandenen mittleren Druckfestigkeit gemäß DIN 1045-1 anzunehmenden Erwartungswert für die Zugfestigkeit des Betons von rd. 4,1 N/mm².

Im Bereich des Freibords (Expositionsklasse XC4) wurde eine Carbonatisierungstiefe von nur 2 mm bis 3 mm ermittelt. Bei der planmäßigen Betonüberdeckung der Bewehrung von 60 mm ist damit der Korrosionsschutz der Bewehrung langfristig sichergestellt.

Der in Tabelle 6 dargestellte Überblick über die ermittelten Materialkennwerte verdeutlicht, dass das Material die im Eignungsversuch eingestellten Eigenschaften sicher erreicht hat, sodass von einer gefügedichten und dauerhaften Betonvorsatzschale ausgegangen werden kann.

6 Zusammenfassung

Mit der Probeinstandsetzung an der Schleuse Feudenheim wurde ein neues Instandsetzungsverfahren unter Praxisbedingungen auf seine Eignung hin untersucht. Ziel war es, ein Bauverfahren für die Instandsetzung von 1-Kammer-Schleusenanlagen zu finden, welches bei Aufrechterhaltung des Schifffahrtbetriebes „unter Betrieb“ realisierbar ist, sodass die ansonsten mehrmonatigen Sperrzeiten vermieden werden können. Als Konzept wurde (in Anlehnung an die klassische und bewährte Bauweise) die Herstellung einer zweilagig bewehrten Vorsatzschale, allerdings unter Verwendung eines schnell erhärtenden Spritzbetons gewählt. Dabei war sicherzustellen, dass die Vorsatzschale bereits wenige Stunden nach ihrer Herstellung wieder be-

Art und Zeitpunkt der Prüfung	Eignungsprüfung		Kontrollprüfung	Zustandsprüfung
	28 d	1 Jahr		
Betonalter bei Prüfung	28 d	1 Jahr	28 d	3 Jahre
Druckfestigkeit (N/mm ²)	48,6	63,4	50,0	60,4
Spaltzugfestigkeit (N/mm ²)	3,4	4,7	6,2	5,8 ¹⁾
statischer E-Modul (kN/mm ²)	29,7	39,0	30,1	32,3 / 38,4 ²⁾
Carbonatisierungstiefe (mm)	0,0	2,0	0,0	2,5
¹⁾ Prüfung der Abreißfestigkeit als Vergleichsgröße zur Spaltzugfestigkeit				
²⁾ Einzelwerte				

Tabelle 6: Ergebniszusammenstellung Materialuntersuchungen (Mittelwerte)

lastet werden kann, d. h. die Schleuse außerhalb eines bestimmten engen Zeitfensters von wenigen Stunden weiter betrieben werden kann.

Die Entwicklung des schnell erhärtenden Spritzbetons einschließlich der Verarbeitungstechnik wurde seitens der BAW zunächst über mehrere Jahre begleitet. Der Praxisversuch am Bauwerk wurde erst nach speziellen Eignungsuntersuchungen im September 2002 begonnen.

Mit dem Versuch wurde die Durchführbarkeit des Instandsetzungsverfahrens an einem Kammerwandblock für alle wesentlichen Arbeitsschritte überprüft:

- Abtrag des Altbetons,
- Einbau von Verankerung und Bewehrung,
- Herstellung und Einbau des Spritzbetons,
- Einbau von Ausrüstungsteilen.

Der Verlauf des Versuches hat bestätigt, dass es möglich ist, Schleusenammerwände mit diesem Konzept in kurzen Zeitfenstern (maximal 8 h, über Nacht) unter Betrieb instand zu setzen. Somit wurde das Instandsetzungsziel erreicht, der Versuch ist als erfolgreich zu bezeichnen. Gleichzeitig ist festzustellen, dass in einigen Schritten des Bauablaufs noch Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Diese Verbesserungen betreffen unter anderem eine rechtzeitige detaillierte Planung auch technischer Einzelheiten (z. B. Nischenpoller), Anpassungen der Baustelleneinrichtung sowie Optimierungen bei Spritzbetonauftrag und Nachbehandlung. Aus technischer Sicht ist die Umsetzung dieser Verbesserungen bei zukünftigen Instandsetzungsvorhaben jedoch problemlos möglich, wie einige bereits im Verlauf des Versuches vorgenommene Anpassungen zeigten.

Die Dauerhaftigkeit der Betonvorsatzschale wurde nach fünf Jahren Nutzung erstmalig bewertet. Vorbehaltlich einer weiteren langfristigen Beobachtung sind, gestützt durch Materialprüfungen an Bauwerksproben, bislang keinerlei Mängel aufgetreten, welche eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit andeuten. Vielmehr wirkt sich die hohe Gefügedichte sehr günstig auf das Carbonatisierungsverhalten und die Frostbeständigkeit aus. Die im Eignungsversuch ermittelten Eigenschaften wurden mit dem applizierten Material sicher erreicht.

Einige lokale Aussinterungen im unteren Bereich der Kammerwand können in eine objektive Bewertung des Bauverfahrens nicht einbezogen werden, da diese bei einer vorherigen Abdichtung des Untergrunds vermieden worden wären (die Vorsatzschale wurde – entgegen den zulässigen Regelwerken – planmäßig direkt auf einen Wasser führenden Untergrund aufgebracht).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem Versuch die Machbarkeit des Instandsetzungsverfahrens nachgewiesen, sowie Verbesserungspotenziale für eine künftig noch bessere und rationellere Ausführung aufgezeigt wurden. Im Rahmen der Probemaßnahme bedingte das Verfahren einen relativ hohen Zeitaufwand. Im Hinblick auf die Bearbeitung größerer Instandsetzungsmaßnahmen ist davon auszugehen, dass sich der spezifische Aufwand deutlich reduzieren wird, da die einzelnen Verfahrensschritte wesentlich rationalisiert werden können.

7 Literatur

- [1] JAMIN, P.: Instandsetzung von Schleusenbauwerken am Beispiel der Schleuse Feudenheim – Abschlussdokumentation. ARCADIS Consult GmbH Darmstadt, 30. November 2003.
- [2] KREKEL, F.: Versuch schnelle Instandsetzungssysteme (Vorsatzschalen $d > 15$ cm) unter Betrieb, Schleuse Feudenheim – Abschlussbericht Bauabwicklung. Wasser- und Schifffahrtsamt Heidelberg, 17. Februar 2004.
- [3] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen-Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe 2004.
- [4] Merkblatt DWA-M 506: Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln in Wasserbauwerken aus Massenbeton. Ausgabe Januar 2006. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

