

Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke (1.3)

Machbarkeitsstudie zur Sanierung der Schleuse Bamberg bei laufendem Schleusenbetrieb

Dipl.-Ing. Oliver Stelzer

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1. Einleitung

Die Schleuse Bamberg am Main-Donau-Kanal ist vom Main her kommend die erste Schleuse der Kanalstrecke. Das Bauwerk wurde 1964 fertig gestellt und gehört somit zur ersten Generation der insgesamt 16 Schleusen des Main-Donau-Kanals. Die Schleuse wurde für den Europa-II-Schubverband bemessen und besitzt somit eine Breite von 12 m, eine Fahrwassertiefe von 4 m und eine nutzbare Länge von 190 m. Die Fallhöhe beträgt im Mittel 10,95 m. Die Kammer besteht aus dreizehn ca. 12,3 m langen Blöcken, die durch gedichtete Bewegungsfugen getrennt sind.

2. Veranlassung

Im März 2004 wurde seitens des WSA Nürnberg auf Rissbildungen an der Kammerwand der Schleuse Bamberg hingewiesen. Bei dem beobachteten Schaden handelte es sich um eine ausgeprägte Längsrissbildung im Bereich des Drainageganges in der östlichen Kammerwand. Der nach unten verlaufende Riss setzt sich bis in den Längskanal fort und war bei Oberwasserstand in der Schleusenammer extrem wasserführend. Das punktuelle Freilegen der äußeren vertikalen Biegezugbewehrung ergab, dass mehrere Bewehrungsstäbe vollständig durchgerissen waren. In den folgenden Abbildungen und Fotos (Bild 2) sind die Lage des Risses im Kammerquerschnitt (oben), eine Ansicht des Risses (mitte) und eines durchgerissenen Bewehrungsstabes (unten) dargestellt.

Eine erste Prüfung der Bestandsunterlagen in Verbindung mit ergänzenden statischen Vergleichsrechnungen ließen beträchtliche Standsicherheitsdefizite im Bereich der östlichen Kammerwand vermuten. Nur durch eine provisorische Sicherungsmaßnahme durch die Rückverankerung der Kammerwand an einer im Hinterfüllungsbereich gerammten Spundwand und zusätzlicher messtechnischer Überwachung der auftretenden Verformungen war es möglich, einem befristeten Schleusenbetrieb zuzustimmen.

Die BAW wurde mit der Untersuchung der Schadensursache beauftragt. Auf der Grundlage der durchgeführten Materialuntersuchungen des Bewehrungsstahls und umfangreicher statischer Berechnungen ergibt sich folgendes Schadensszenario: Durch die äußere Belastung (Erd- und Wasserdruck) entsteht ein Trennriss, der sich vom Drainagegang nach unten bis in den Längslauf erstreckt. Dieser Riss bewirkt zunächst keine Abminderung der Standsicherheit. Die Rissbreite ist jedoch relativ groß, da nur wenig Bewehrung vorhanden ist. Durch den Riss strömt in Abhängigkeit vom Schleusenfüllstand Wasser bzw. Luft. Damit sind sehr günstige Korrosionsbedingungen gegeben. Die Korrosion führt zu Materialabtrag und Korrosionsnarben an der Stahloberfläche, was lokal zu zyklisch veränderlichen Spannungsspitzen führt. Dadurch entstehen Spannungsschwingbreiten, die größer als die mittleren Werte aus den statischen Berechnungen sind und letztendlich zum Ermüdungsbruch im Stahl führen. Durch diesen Sachverhalt wurde das Ergebnis der Stahluntersuchung mit Schwingungsrisskorrosion als Schadensursache bestätigt.

3. Machbarkeitsstudie zum Sanierungskonzept

Die statischen Untersuchungen der östlichen Kammerwand hatten ergeben, dass neben dem geschädigten Bereich am Drainagekanal weitere Teile des Bauwerkes hoch beansprucht sind und dem heutigen geforderten Sicherheitsniveau nicht mehr entsprechen. Hier sind vor allem die Wandstiele neben dem Längslauf und Bereiche der Kammersohle zu nennen. Dort ist rechnerisch eine Schubbewehrung erforderlich, die gemäß

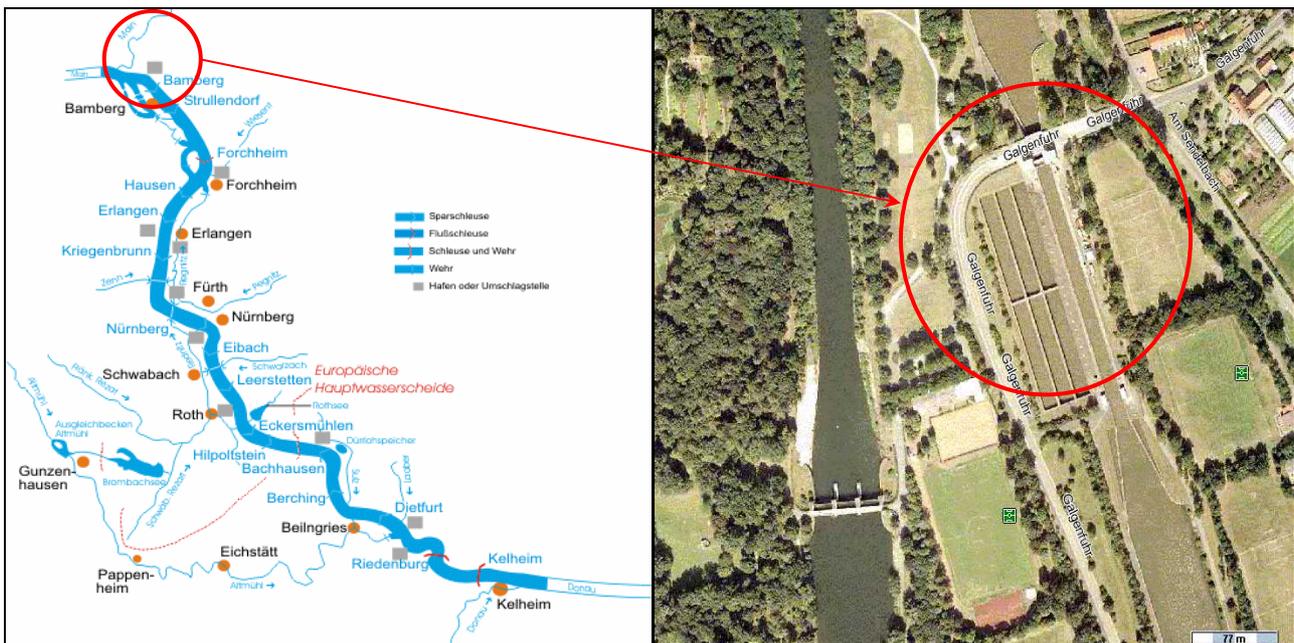


Bild 1: Main-Donau-Kanal (links) und Schleuse Bamberg (rechts)

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Machbarkeitsstudie zur Sanierung der Schleuse Bamberg bei laufendem Schleusenbetrieb

den Bestandsunterlagen nicht ausgebildet wurde. Eine Abschätzung der erforderlichen Biegezugbewehrung zeigt, dass die vorhandene Bewehrung für das anzusetzende Lastniveau nicht ausreicht. Daher wird eine

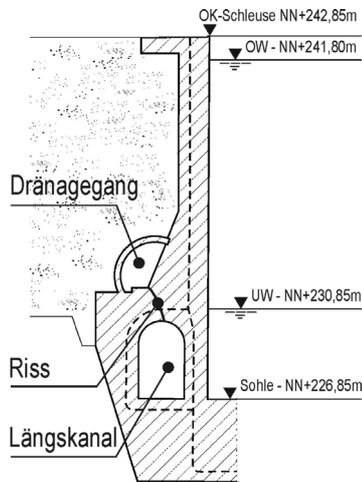


Bild 2: Schadensbild im Kammerquerschnitt (oben), im Dränagegang mit horizontalem Trennriss (mitte) und Detail mit gerissenem Bewehrungsstab (unten)

Instandsetzung der geschädigten Kammerwand erforderlich, die für einen längerfristigen Betrieb der Schleusanlage auszulegen ist. Die Sanierung muss unter laufendem Betrieb und unter Berücksichtigung der Baufeldfreihaltung für eine optionale zweite Schleuse neben der bestehenden erfolgen.

Ziel der durchgeführten Machbarkeitsstudie war die Entwicklung einer statisch-konstruktiven und bautechnologisch optimalen Sanierungsvariante, durch die die geschädigte Kammerwand ertüchtigt und der Drainagegang ersetzt werden kann. Die Kammersohle kann unter laufendem Betrieb nicht ertüchtigt werden. Die Verstärkung der Kammerwand ist daher so auszubilden, dass durch die neue Konstruktion keine zusätzlichen Beanspruchungen in der Sohle hervorgerufen werden. Weiter muss die Kammerwand, unabhängig von der Tragfähigkeit der Sohle, standsicher werden. Zur Verstärkung der Kammerwand wurden verschiedene Sanierungsvarianten untersucht und eine massive Verstärkung der vorhandenen Stahlbetonkonstruktion inklusive des erdseitigen Kammerwandstiels gewählt. Dabei sind die Fugen zwischen dem alten und neuen Beton kraftschlüssig auszubilden, so dass die verstärkte Schleusenwand als Monolith wirken kann (Bild 3).

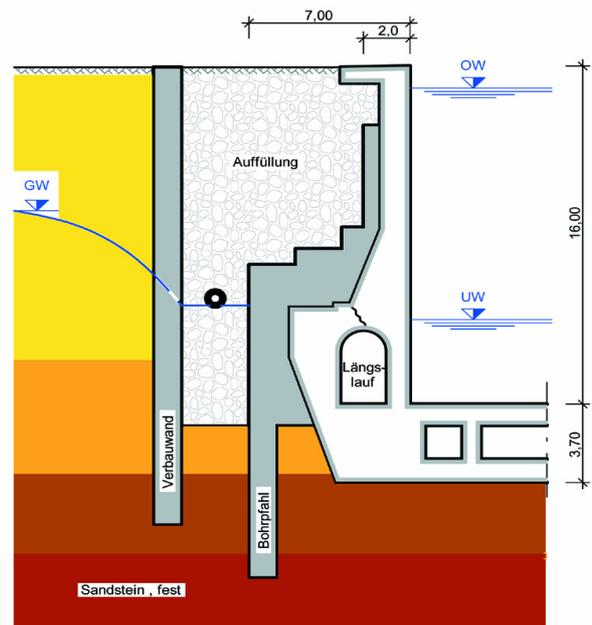


Bild 3: Empfohlene Sanierungsvariante

Die Verstärkung reduziert die Beanspruchung der vorhandenen vertikalen wasserseitigen Wandbewehrung bei Oberwasserstand der Schleuse. Durch die schubfeste Anbindung der neuen Wandkonstruktion an den bestehenden Wandquerschnitt wird die vorhandene vertikale erdseitige Bewehrung entlastet. Die vertikale Zugbewehrung, die in dem neu anbetonierten Wandabschnitt vorgesehen ist, kann ausreichend dimensioniert werden. Die Lage der neuen Drainage neben dem Bauwerk ermöglicht zudem eine massive Rissüberbrückung im Bereich der alten Drainage. Durch die Verbreiterung des erdseitigen Kammerwandstiels wird dessen Steifigkeit erhöht und die Querkraft im kammerseitigen Stiel reduziert. Ebenfalls wird durch die zusätzliche Auflast, auch bei Unterwasserstand der Schleuse, der erdseitige Stiel überdrückt. Die vorhandene, hoch beanspruchte erdseitige Biegezugbewehrung ist für die

Lastabtragung des neuen Systems nicht mehr erforderlich. Die Einbindung der neuen Wandkonstruktion in den tiefer liegenden steifen Sandstein reduziert die Normalkraftbeanspruchung in der Sohlplatte aufgrund der Reduktion der Wandverdrehung deutlich. Die Zugkraft in der Sohle kann rechnerisch bei Oberwasserstand dadurch mehr als halbiert werden. Folglich wird die für den Ermüdungsnachweis maßgebende Spannungsamplitude reduziert und die Lebenserwartung des vorhandenen Betonstahls erhöht.

Baugrubenkonzzept

Zur Umsetzung der empfohlenen Sanierungsvariante ist eine 17 m tiefe Baugrube neben der Kammerwand erforderlich. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde daher ein Baugrubenkonzzept erstellt, welches den Schwerpunkt dieses Beitrages bildet.

Bereits zur Klärung der Schadensursachen und der Dimensionierung der zwischenzeitlichen Bauwerkssicherung wurden Baugrunduntersuchungen durchgeführt und im Hinblick auf die Sanierung der Schleuse ein Baugrundgutachten erstellt. Unter einer ca. 13 m mächtigen Auffüllung aus kiesigen Sanden wurde Burgsandstein (mittlerer Keuper) in unterschiedlichen Verfestigungs- und Verwitterungszuständen angetroffen (vgl. Bild 4). Der aus der Bauzeit bekannte generelle Baugrundaufbau hinter der Kammerwand wurde damit bestätigt. Für die Nachrechnungen des Schadensfalles und die Erarbeitung einer Sanierungsvariante war vor allem das Verformungsverhalten des Baugrundes von Bedeutung. Deshalb wurden neben Laborversuchen in den teilweise gering verfestigten Keuperschichten Bohrlochaufweitungsversuche mit dem Dilatometer und der Seitendrucksonde als in-situ-Versuche durchgeführt. Die Festigkeit und Steifigkeit der Auffüllung wurde anhand der Ergebnisse von Sondierungen mit der schweren Rammsonde beurteilt.

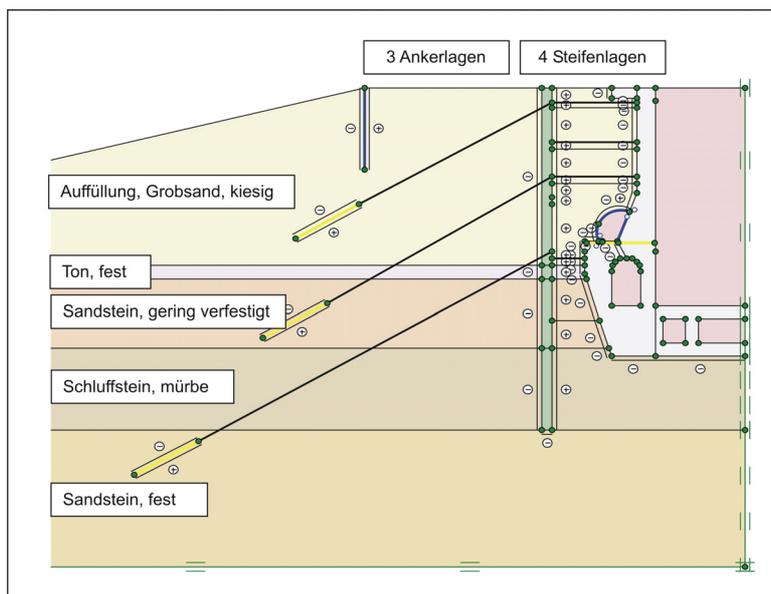


Bild 4: Berechnungsmodell Schleuse Bamberg mit Baugrubenkonstruktion und Baugrundaufbau

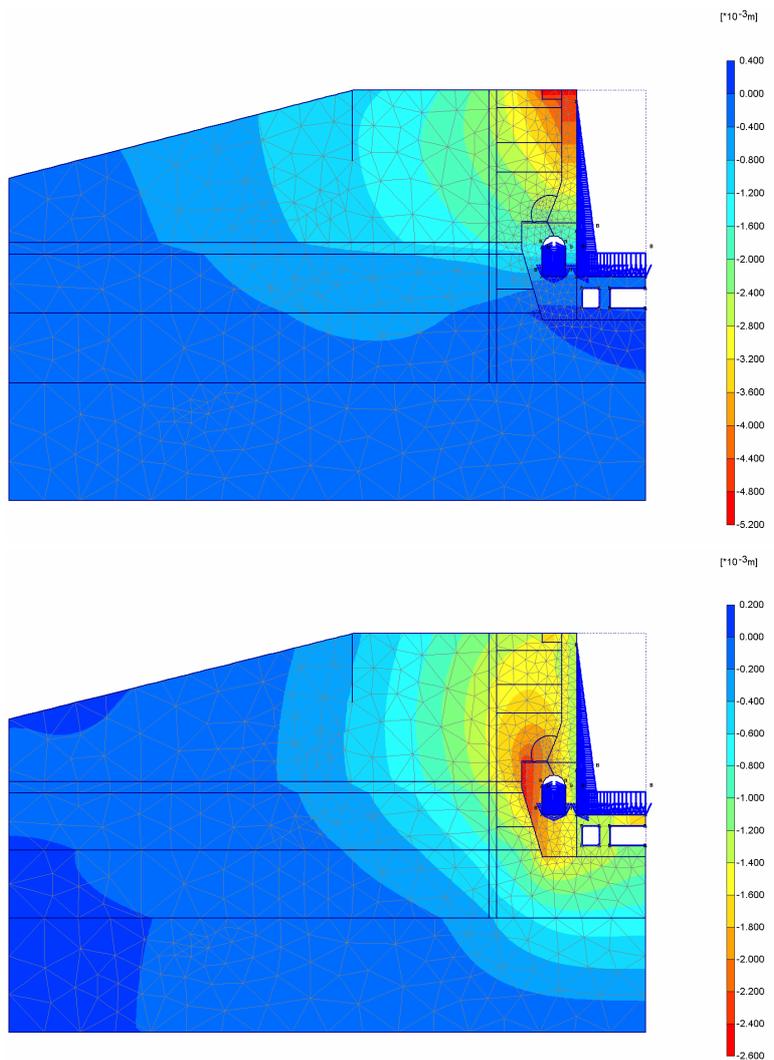


Bild 5: Horizontal- und Vertikalverformungen infolge Schleusenfüllung von Unter- auf Oberwasserniveau

Im Zuge der Erarbeitung eines Baugrubenkonzepes wurde ein Berechnungsmodell erstellt, welches die mechanische Kopplung zwischen dem anstehenden Boden, der Baugrubenwand und der Schleuse berücksichtigt. Als Baugrubenverbau ist eine Bohrpfahlwand vorgesehen, die durch drei Ankerlagen rückverankert wird. Da die Bauarbeiten bei laufendem Schleusenbetrieb erfolgen sollen, muss die Kammerwand durch ein aus mindestens vier Lagen bestehendes Steifensystem stabilisiert werden, um die bei Oberwasserstand der Schleuse entstehenden Kräfte abzutragen.

Die Berechnung erfolgte mit der Finite-Elemente-Software Plaxis im ebenen Verzerrungszustand für einen repräsentativen Schleusenquerschnitt. Dabei wurden alle Bauzustände bis zum Erreichen der Endtiefe der Baugrube berücksichtigt. Als Stoffgesetz für den Boden fand das Hardening-Soil-Modell und für den Fels das Mohr-Coulomb Modell Verwendung. Die Steifigkeit der Auffüllung wurde anhand des Vergleiches von berechneten mit am Bauwerk gemessenen Ver-

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Machbarkeitsstudie zur Sanierung der Schleuse Bamberg bei laufendem Schleusenbetrieb

formungen kalibriert. Die berechneten horizontalen Verschiebungen am Wandkopf liegen beim Lastwechsel von Unter- auf Oberwasser bei ca. 5 mm und entsprechen etwa den am Bauwerk gemessenen Verschiebungen von 3 - 5 mm. Die Vertikalverformungen liegen bei ca. 1 - 2 mm und konnten ebenfalls durch Nivellements bestätigt werden. Das Verschiebungsfeld infolge Schleusenfüllung für den Oberwasserstand ist in Bild 5 getrennt für den Horizontal- (oben) und den Vertikalanteil (unten) dargestellt.

Das Optimierungsziel der Berechnung war, die Beanspruchung der bereits beschädigten Schleuse während

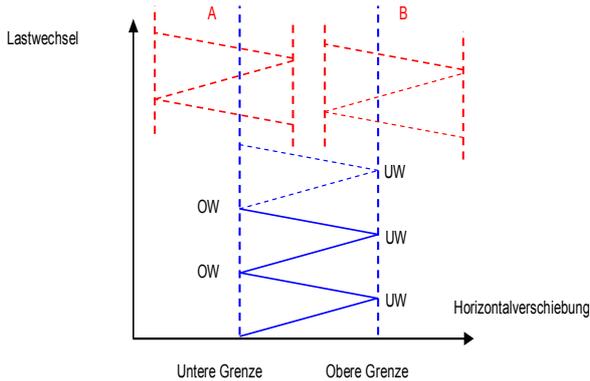


Bild 6: Horizontalverschiebung des Wandkopfes infolge Lastwechsel UW-OW im Ist-Zustand (blau) und mögliche Veränderungen A und B infolge der Herstellung der Baugrube (rot)

der Sanierung nicht über das derzeit vorherrschende Niveau hinaus zu vergrößern. Dazu ist es erforderlich, die Verformungen der Schleuse im jetzigen Zustand, vor Beginn der Sanierung, für den Unterwasser- (UW) und Oberwasserstand (OW) zu ermitteln und die in den einzelnen Bauzuständen auftretenden Verformungen durch Optimierung der Anzahl und Lage sowohl der Anker und deren Vorspannung als auch der Steifen gezielt so zu steuern, dass die Horizontalverformungen der Kammerwand während der Baumaßnahme in der heute vorhandenen Schwankungsbreite bleiben (vgl. Bild 6).

Es wurden verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Ankervorspannungen untersucht. Dabei ergab sich, dass bei sehr hoher Vorspannung zwar die Verformung der Verbauwand und damit auch die Steifenkräfte bei UW minimiert werden aber die Kammerwand sich nicht in der geforderten Bandbreite der Verformungen bewegt. Ein zu starkes Vorspannen der Anker entlastet die Schleusenammerwand, was zur Unterschreitung der in Bild 6 dargestellten unteren Grenze der Horizontalverschiebungen führt (Möglichkeit A). Dagegen führt ein zu geringes Vorspannen zu einer Überschreitung der oberen Grenze (Möglichkeit B). Durch Optimierung der Ankervorspannung erreicht man die Einhaltung des Verformungskriteriums, wie in Bild 7 dargestellt. Die Steifen sind bei UW nicht lastfrei, sondern sie leiten die zur Einstellung der gewünschten Verformung der Kammerwand erforderlichen Kräfte von der Verbauwand zur Schleuse. Zusätzlich ist noch die schadhafte Aufnahme der Steifenkräfte nachzuweisen, die im Gegensatz zum ursprünglich infolge des Eigengewichtes der Hinterfüllung der Kammerwand wirksamen Erddruckes konzentrierte Lasten darstellen. Auf diese Untersuchung wurde jedoch im Rahmen der

Machbarkeitsstudie verzichtet, da diese Problematik durch eine Erhöhung der Anzahl der Steifenlagen zu bewältigen ist.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Bauwerk-Verbau-Boden-Interaktion während der Sanierung von entscheidender Bedeutung ist. Mit den berechneten Verformungen steht eine Prognose des Systemverhaltens zur Verfügung, die im Rahmen der Bauausführung messtechnisch zu kontrollieren ist. Zur Umsetzung dieser sogenannten Beobachtungsmethode ist die Verformung der Kammerwand und die Entwicklung der Steifenkräfte messtechnisch zu überwachen. Bei eventueller Überschreitung von im Vorfeld festzulegenden Grenzwerten der Bauwerksverformung kann durch Regulierung der Steifenkräfte eingegriffen werden.

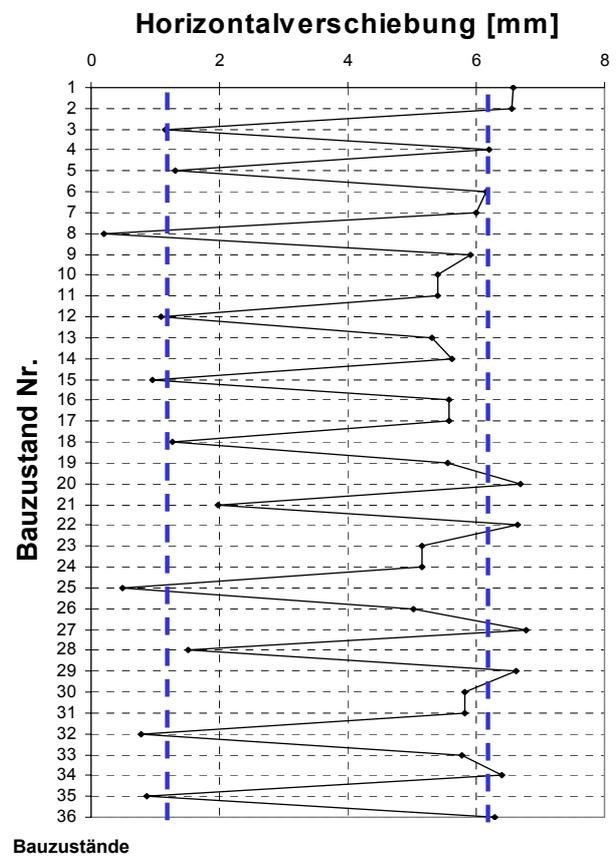


Bild 7: Horizontalverschiebung der Kammerwandkrone in den einzelnen Bauzuständen in [mm]

01 Ausgangszustand	19 UW
02 Unterwasser (UW)	20 Aushub 3 auf 7,0 m
03 Oberwasser (OW)	21 OW
04 UW	22 UW
05 OW	23 Ankerlage 2 anspannen
06 Pfahlherstellung	24 Steifenlage 3 einbauen
07 Aushub 1 auf 1,5 m	25 OW
08 OW	26 UW
09 UW	27 Aushub 4 auf 13,0 m
10 Ankerlage 1 anspannen	28 OW
11 Steifenlage 1 einbauen	29 UW
12 OW	30 Ankerlage 3 anspannen
13 UW	31 Steifenlage 4 einbauen
14 Aushub 2 auf 4,5 m	32 OW
15 OW	33 UW
16 UW	34 Endaushub auf 17,0 m
17 Steifenlage 2 einbauen	35 OW
18 OW	36 UW

Bild 7: Horizontalverschiebung der Kammerwandkrone in den einzelnen Bauzuständen in [mm]

Zur Herstellung der Baugrube werden drei Bauabschnitte empfohlen, wobei erst nach Fertigstellung des jeweiligen Abschnittes mit dem nächsten begonnen wird. Dieses abschnittsweise Vorgehen reduziert den Aufwand für die messtechnische Überwachung (Anzahl der Pressen). Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der Sanierung des am meisten beschädigten Bereiches (Kammermitte) bereits Erfahrungen mit der Umsetzung des baubetrieblichen Konzeptes und der Reaktion des Systems in den einzelnen Bauzuständen aus dem bereits sanierten Abschnitt im Bereich des Oberhauptes vorliegen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden Möglichkeiten zur Sanierung der östlichen Kammerwand der Schleuse Bamberg bei laufendem Schleusenbetrieb untersucht. Die letztendlich von der BAW empfohlene Sanierungsvariante sieht eine massive Verstärkung des Wandquerschnitts vor, die im Schutze einer 17 m tiefen Baugrube hergestellt werden soll. Im Nachgang zur Machbarkeitsstudie wurde die weitere Planung zur Umsetzung der Sanierung beauftragt. Diese verfolgt das vorgeschlagene Sanierungskonzept weiter. Zur Vereinfachung des ohnehin sehr komplexen Bauablaufs werden die Steifen soweit möglich beim Schleusenwasserstand auf Unterwasser lastfrei gestellt und nehmen nur die beim Anstieg des Wasserstandes in der Schleuse entstehenden Kräfte auf.

Die Bauweise der Schleuse Bamberg wurde auf sechs weitere Schleusen am Main-Donau-Kanal übertragen ("erste Schleusengeneration"). Da Materialermüdung zum plötzlichen Versagen ohne Vorankündigung führt und somit ein hohes Gefährdungspotential darstellt werden auch diese Schleusen derzeit genauer untersucht.

Literatur

DEUTSCHER, M., STELZER, O.: "Machbarkeitsstudie zur Sanierung der östlichen Kammerwand der Schleuse Bamberg", Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2004

"Schadensfall Schleuse Bamberg", Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2004

Verfasser

Dipl.-Ing. Oliver Stelzer
Referat Grundbau
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3170
E-Mail: oliver.stelzer@baw.de