



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAW Kolloquium

Tagungsband

Erhalten und Ertüchtigen von Bauwerken
4. und 5. November 2013 in Karlsruhe



Schleuse Hausen am MDK - Tragwerksertüchtigung der östlichen Kammerwand

Dipl.-Ing. T. Mai (Grontmij GmbH, Hannover)

Planungsgeschichte

Aufgrund eines Schadensfalls an der Schleuse Bamberg im März 2004 wurden alle Schleusen des MDK hinsichtlich Ihrer Standsicherheit qualitativ überprüft.

So auch die Schleuse Hausen am Main-Donau-Kanal (MDK) in km 32,90 zwischen den Schleusen Forchheim und Erlangen.

Beschreibung der Schleusenanlage

Die Schleuse Hausen wurde 1967 fertig gestellt und entspricht in ihrer Baukonstruktion der Reihe der bis Anfang der 70er Jahre erbauten Schleusen am MDK mit folgenden wesentlichen Konstruktionsmerkmalen:

- Unsymmetrischer U-förmiger Trog mit unsymmetrischer Beanspruchung
- Sparbecken auf der Westseite
Ostseite für Erweiterungsmöglichkeit mit zweiter Kammer freigehalten
- Schlanke Konstruktion der östlichen Kammerwand
- Dauerhafte Grundwasserabsenkung in außen liegendem Drainagegang
- Blockeinteilung in Längsrichtung
- Füllung und Leerung über Grundläufe mit Füllöffnungen in der Kammersohle; Anschluss an MDK und Sparbecken über Längskanäle
- Pumpkanal als Leerschuss neben östlichem Längskanal

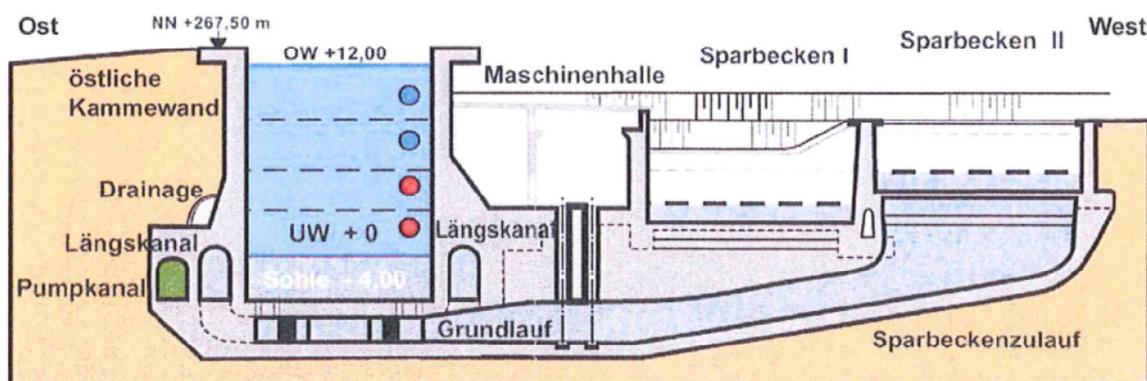


Bild 1: Schleusenquerschnitt

Bauwerkshauptabmessungen

Kammerlänge	200 m
Nutzlänge	190 m
Nutzbreite	12 m
Hubhöhe	12 m
Haltung Unterwasser	NN + 254,50 m
Haltung Oberwasser	NN + 266,50 m
Drempeltiefe	4,00 m
Bauzeit	1965 -1967
Inbetriebnahme	1970

Veranlassung

Bei Bauwerksprüfungen im Jahr 2004 und 2005 wurde ein durchgängiger Riss im Verschneidungsbereich der Sohle des Drainagegangs und der dort schräg verlaufenden östlichen Kammerwand festgestellt.

Während Schleusungsvorgängen wurde eine Blasenbildung am Riss beobachtet, die eine Verbindung des Risses zwischen Drainagegang und Längskanal vermuten ließ. Mit Kernbohrungen wurde eine Rissweite von 1,0 bis 1,5 mm festgestellt.

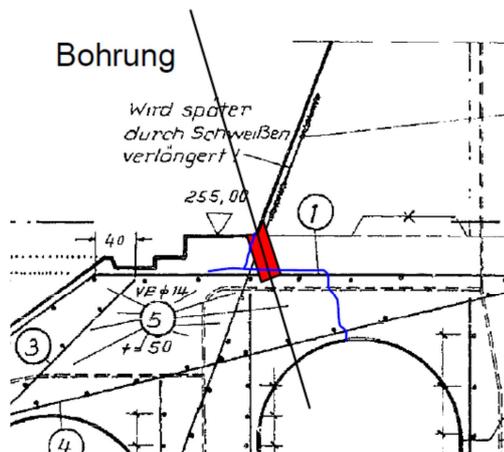


Bild 2: Risserkundung

Zur Festlegung der Sanierungsbereiche wurden Standsicherheitsberechnungen in verschiedenen Stufen nach dem Stand der heutigen Normung aufgestellt. In einer abschließenden nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnung am ebenen Scheibenmodell wurden Bereiche ermittelt, für die Verstärkungsmaßnahmen notwendig wurden.

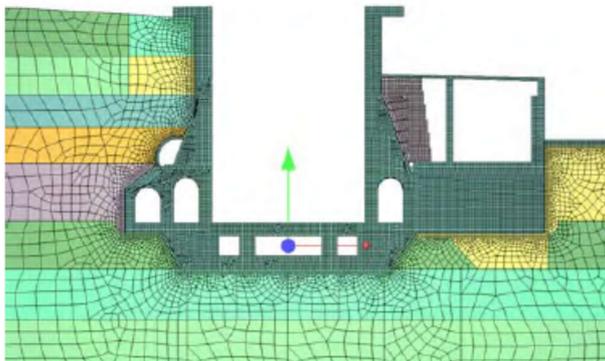


Bild 3: FEM-Scheibenmodell der BAW

Im Modell wurden die Beton-, Bewehrungs- und Bodenquerschnitte mit jeweils gesonderten Elementen und deren spezifischen Materialgesetzen diskretisiert. Dabei wurden auch Effekte wie Steifigkeitsänderungen durch Rissbildung im Beton, Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen, veränderte Schubübertragungen im Rissbereich, Fließen des Betonstahls, Plastifizierung im Boden, Wandreibungseffekte und Bodenablösungen von der Betonoberfläche berücksichtigt.

Eine Modellkalibrierung wurde durch einen Vergleich gemessener mit errechneten Wandkopfverformungsdifferenzen über die Veränderung der Baugrundsteifigkeit vorgenommen. Eine Plausibilisierung des kalibrierten Modells erfolgte anhand der errechneten und beobachteten Rissbereiche.

An diesem Modell wurden Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- und Ermüdungsnachweise geführt. Als Ergebnis daraus wurden die einzelnen Bauteile in die Defizitkategorien K1 (Verstärkungsbedarf) und K2 (tolerierbares Defizit) eingestuft.

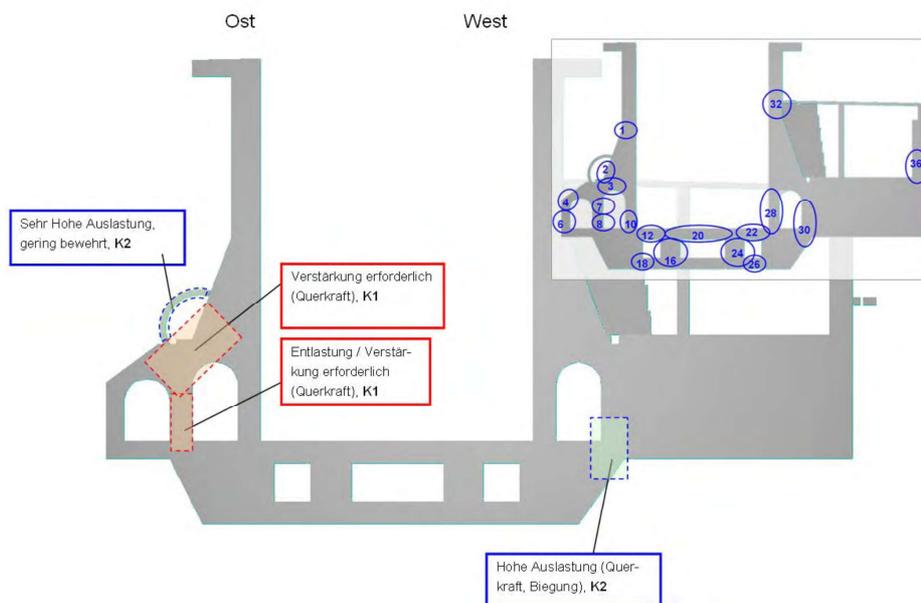


Bild 4: Einstufung der Verstärkungsbereiche

Bei der ersten Ortsbesichtigung im Zuge der Planung wurde festgestellt, dass sich die Drainageringe in einem sehr schlechten baulichen Zustand befanden (z.B. wasserführende Fugen mit Materialaustrag, Versätze von bis zu 6 cm in den Fertigteilen, korrodierte Bewehrung, horizontale Risse in Schleusenlängsrichtung in allen Fertigteilen, versinterte Fugen). Die Ringe mit doppelten Horizontalrissen waren bereits mit Holzkonstruktionen abgestützt. An den Holzstützen zeigte sich bereits ca. 8 Wochen nach Einbau starker Schimmelbefall. Da diese Maßnahme keine dauerhafte Lösung darstellte, wurde die Instandsetzung der Drainageringe in die Gesamtplanung mit einbezogen.



Bild 5: Holzstützenaussteifung



Bild 6: Längsriss im Gewölbescheitel

Aus den o.g. Schadensbeurteilungen ergaben sich notwendige Verstärkungsmaßnahmen an den unten genannten Bauteilen. Die vorgesehenen Maßnahmen sind das Ergebnis von Variantenuntersuchungen im Rahmen der Vorplanung.

- Bauteil 1 Stiel zwischen Längskanal und Leerschuss Schubbewehrungsverstärkung durch nachträglich eingebohrte Bewehrung
- Bauteil 2 Stahlbetonfertigteile Drainagegang luftseitige Spritzbetonvorsatzschale mit Verbund zu den vorhandenen Halbschalen
- Bauteil 3 Kammerwand Drainagegangbereich Schubbewehrungsverstärkung durch Vernetzung

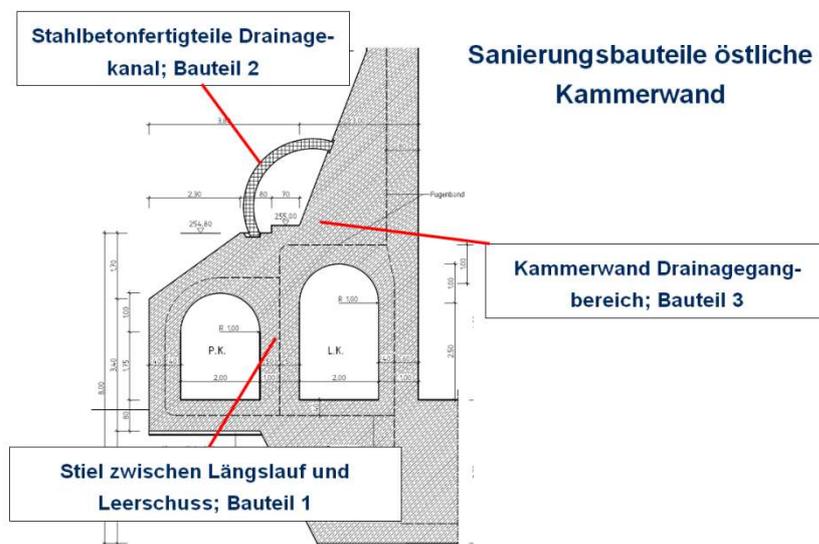


Bild 7: Bauteilbezeichnung Sanierungsbauteile östliche Kammerwand

Detail M:1:5

Verankerung in Ebene der Biegezugbewehrung
mit außen liegender Ankerplatte und Kontermutter

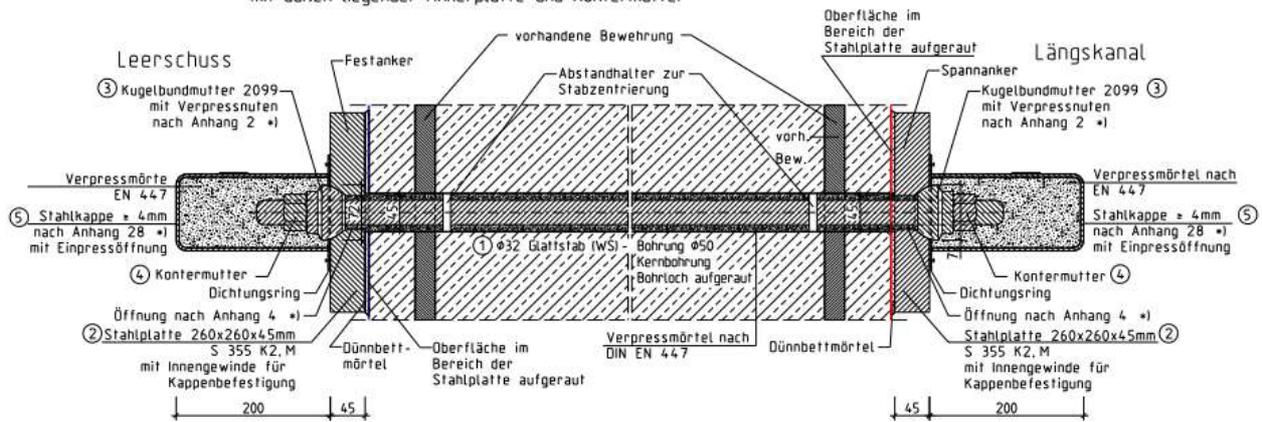


Bild 9: Schubbewehrungsverstärkung



Bild 10: Ankerplatte mit Abdeckkappe



Bild 11: Kugelbundmutter auf Ankerplatte

Bauteile

- Dywidag Stabspannstahl Ø 32 mm nach ETA-Zulassung, Material St 950/1050
- Verankerungsbauteile nach ETA-Zulassung
- Verankerungsplatte quadratisch
Abmessungen 260 x 260 x 45 mm
Material S 355 K2, M
- Abdeckkappe
Material S 235 JR
- Verpressmörtel nach DIN EN 447
- Dünnbettmörtel nach bauaufsichtlicher Zulassung

Bauteil 2 - Stahlbetonfertigteile Drainagegang

Auf der Innenseite der Drainageringe wurde eine 10 cm starke bewehrte Spritzbetonschale aufgebracht. Diese wurde über Verbundbewehrung an den vorhandenen Stahlbetonquerschnitt angeschlossen und gemäß heutigen Vorschriften mit Mindestbewehrung versehen. Dadurch wurde die vorhandene Bauteildicke von 25 cm auf 35 cm vergrößert.

Die Drainageringe werden durch vertikale Erdaufasten, horizontale Erddrücke und Verformungen der Kammerwand als Stützensenkung für das Kopfauflager belastet. Die Stützensenkung wird als zyklische Last für den Betriebsfestigkeitsnachweis berücksichtigt. Alle Nachweise wurden an Stabquerschnitten durchgeführt.

Durch die so erzeugte Vergrößerung der statischen Höhe und den Einbau einer zusätzlichen luftseitigen Bewehrung sind alle Bemessungsdefizite beseitigt. Die Sickerschlitze zwischen den einzelnen Fertigteilen bleiben frei.

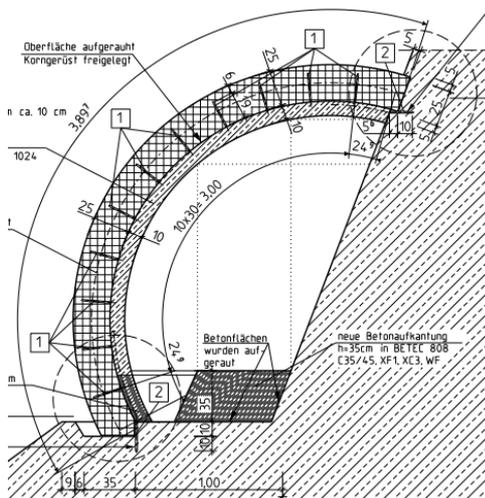


Bild 12: Querschnittsverstärkung

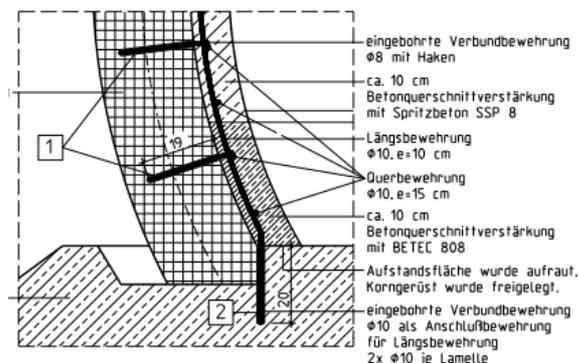


Bild 13: Detail Bewehrungsanschluss



Bild 14: Bauteilertüchtigung Drainageringe



Bild 15: Abschnittsweise Betonage

Durch diese Ertüchtigungsmaßnahme konnte bei geringen Baukosten und Anwendung eines bewährten Bauverfahrens eine ausreichende Trag- und Gebrauchstauglichkeit erreicht werden. Die Nutzung stark vorgeschädigter vorhandener Bauteile ohne die Möglichkeit zum Einbau einer erdseitigen Mindestbewehrung wurde in Kauf genommen.

Bauteile

- Spritzbeton für Querschnittsergänzung C 35/45 XF1, XC3, WF
- Betonstahl BSt 500 S
- Injektionsmörtel Hilt-Hit-HY 150 max nach ETA-Zulassung

Bauteil 3 - Kammerwand Drainagegangbereich

Die statische Berechnung für das Bauteil 3 erfolgte an einem Teilsystem der östlichen Kammerwand gemäß Bild 16, welches durch die gestrichelte Linie begrenzt ist.

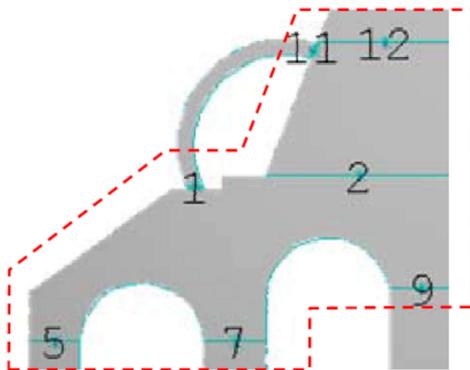


Bild 16: Bemessungsschnitt Bauteil 3

An diesen Grenzen lagen von der BAW übergebene Schnittgrößen, die auf gleiche Weise wie bei Bauteil 1 ermittelt wurden, vor.

Die Bemessung wurde an einem Stabwerkssystem mit Nachweis der Hauptzug- und Hauptdruckstreben durchgeführt. Die Bewehrungsstäbe wurden dabei als Normalkraftstäbe modelliert, die Zug- und Druckkräfte aufnehmen können. Die Betonquerschnitte wurden als reine Druckstreben modelliert, die bei Zugbeanspruchung ausfallen.

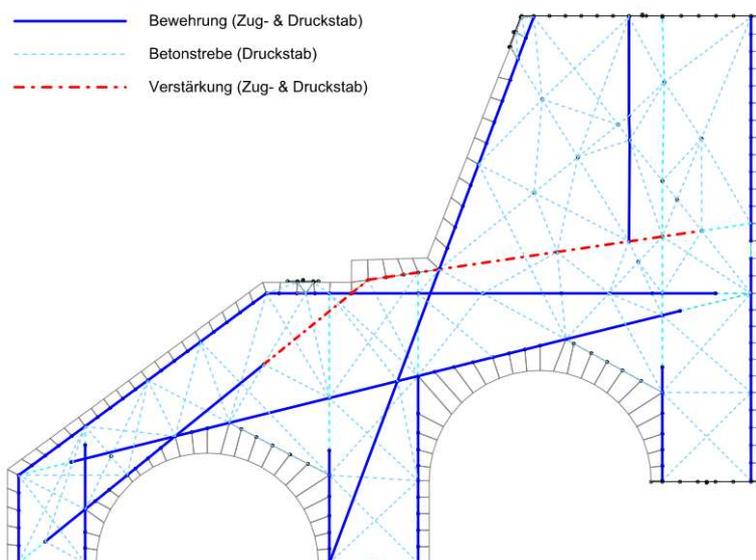


Bild 17: Stabwerksdiskretisierung

Die Hauptzugspannungstrajektorien an der Unterkante der Kammerwand, für die keine Zugbewehrung vorhanden war, wurden durch nachträglich eingebaute Bewehrung ertüchtigt. Diese Zusatzbewehrung ist im statischen Modell mit berücksichtigt. Entsprechend der Neigung der Hauptzugspannungstrajektorie wurde vom Drainagegang aus Bewehrung schräg in die Kammerwand gebohrt. Die Verankerung der Bewehrung in der Kammerwand erfolgt innerhalb der Betondruckzone. Erdseitig ist die Bewehrung im Stahlbetonquerschnitt oberhalb des Leerschusses verankert.

Vor Beginn der Bewehrungsarbeiten wurde der wasserführende Riss in Richtung Längskanal mittels Polyurethansuspension verpresst.

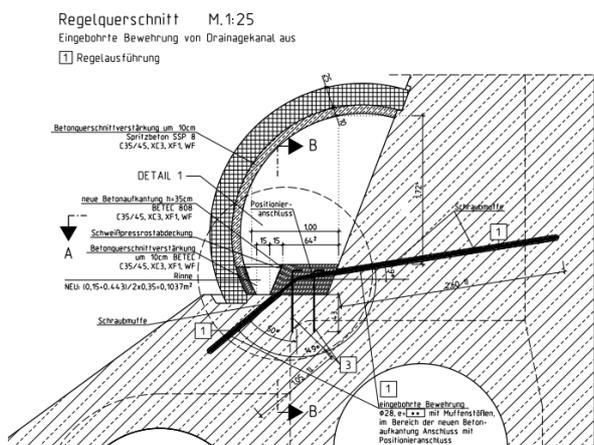


Bild 18: Verstärkungsbewehrung

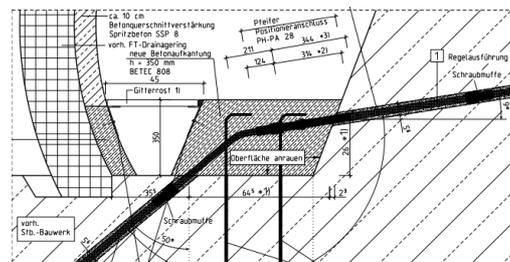


Bild 19: Positionsmuffe und Betonstufe

Beide Bewehrungen wurden vom Drainagegang aus eingebaut. Die Bohransatzpunkte liegen im Bereich der ursprünglich vorhandenen unbewehrten Schwelle, die für den Bauzustand abgebrochen wurde.

Wegen möglicher Einbaulängen mussten die Bewehrungsstäbe in Teillängen von maximal einem Meter Länge in die vorab erstellen Kernbohrlöcher eingebaut und mit Muffen gestoßen werden. Der Verbund zwischen vorhandenem Beton und den einzelnen Bewehrungsstäben erfolgte durch einen Hilti-Hit-Mörtel im aufgerauten Bohrloch. Im Schwellenbereich wurden die Bewehrungsstäbe über Positionsmuffen gekoppelt. Die Schwelle wurde mit Anschlussbewehrung an den Bestand und mit Mindestbewehrung versehen und in veränderten Abmessungen nach Kopplung der Stäbe wieder aufbetoniert.

Um Spannungsaktivierungen in der zusätzlichen Bewehrung bei Lastwechseln von Ober- zu Unterwasser im Gebrauchszustand zu ermöglichen, wurde die Kopplung der Bewehrungsstäbe bei Schleusenwasserständen auf Oberwasser durchgeführt. Vor einem Absenken des Kammerwasserstandes auf Unterwasser wurde die Stahlbetonschwelle wieder hergestellt, um die Umlenkkräfte aus der Richtungsänderung der Bewehrung aufzunehmen.



Bild 20: Verstärkungsbewehrung



Bild 21: Stufe vor Betonage

Bauteile

- Beton für Schwellenaufbau C 35/45 XF1, XC3, WF
Zementgebundener vergüteter Rapidvergussbeton (Betec 808)
- Betonstahl Ø 28 mm BSt 500 S
- Pfeifer-Positionieranschluss PH-PA 28 nach bauaufsichtlicher Zulassung
- Injektionsmörtel Hilt-Hit Re 500 Max nach ETA-Zulassung

Bauablauf und Bauverfahren

Bauteil 1 - Stiel zwischen Längskanal und Leerschuss

Trockenlegung - Abschottungen

Zum Einbau der Bewehrung waren Bohrlöcher im Stiel zwischen Längskanal und Leerschuss erforderlich. Für die Bohrlochherstellung mussten beide Kanäle trocken sein und daher gegen Oberwasser, Unterwasser und Kammer abgeschottet werden. Die Abschottung des Leerschusses erfolgte mit Revisionsverschlüssen gegen das Ober- und Unterwasser. Der Längskanal wurde gegen Ober- und Unterwasser an den vorhandenen Revisionsverschlüssen und den Füll- bzw. Entleerungsschützen abgeschottet. In Lamelle 11 hat der Längskanal Ost über zwei Kanäle eine Verbindung zum oberen Grundlaufsystem der Kammer. Der Wasserstand korrespondiert hier mit den Wasserständen in der Kammer entsprechend den Schleusungsvorgängen. Eine Abschottungsmöglichkeit zum Längskanal war hier nicht vorhanden aber notwendig. Somit war als Baubehelf eine Grundlaufabschottung einzubauen.

Als Dichtungslinien für die Trockenlegung wurden der unterwasserseitige Revisionsverschluss gesetzt, das Obertor geschlossen und die Revisionsverschlüsse in den Längskanälen heruntergefahren. Der Zugang zum Längskanal erfolgte von den unterwasserseitigen Ausläufen. Der Leerschuss war dabei wassergefüllt, um eine eventuelle Hochwasserabfuhr zu gewährleisten.



Bild 25: Revisionsverschluss Unterwasser

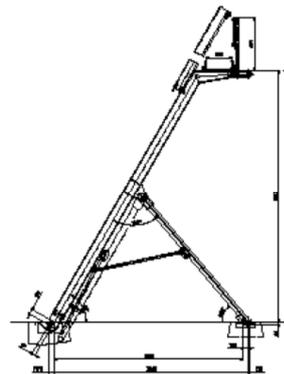
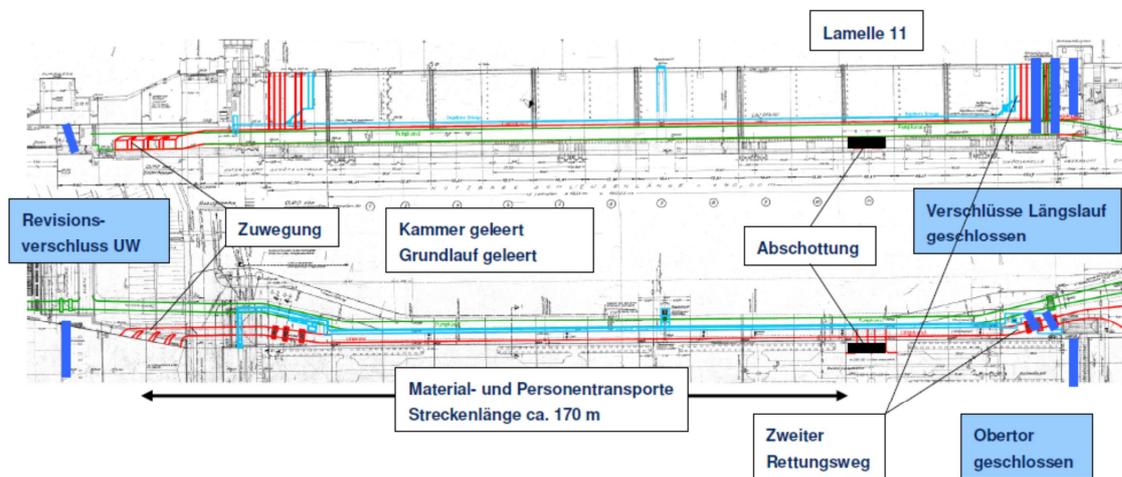


Bild 26: Prinzip Revisionsverschluss



**Ein- und Ausbau in Schiffahrtssperren
 Hochwasserabfuhr durch Leerschuss**

13

Bild 27: Bauablauf Einbau Grundlaufabschottung

Alle Bauteile mussten mit Mobilkränen in die Kammer am Unterhaupt transportiert werden. Die Transporte im Längskanal erfolgten dann über Rollen bzw. Plattenwagen. Die Materialtransporte oberhalb der Grundlaufzuläufe wurden über eine Kranbahn, die am Beton des Längskanals befestigt war, durchgeführt. Für Personen wurde dort eine Brücke als Arbeitsgerüst installiert.



Bild 28: Bauteil mit Transportrollen



Bild 29: Zuwegung am Unterhaupt



Bild 30: Kranbahn und Brücke über Zulauf



Bild 31: Schott im Grundlauf

Das Ablassen aller Bauteile erfolgte dann über Kettenzüge. Eine Schottendmontage wurde anschließend in den Grundläufen durchgeführt. Das Aufrichten und Befestigen der Schotte an den Einbaurahmen wurde über Kettenzüge durchgeführt.

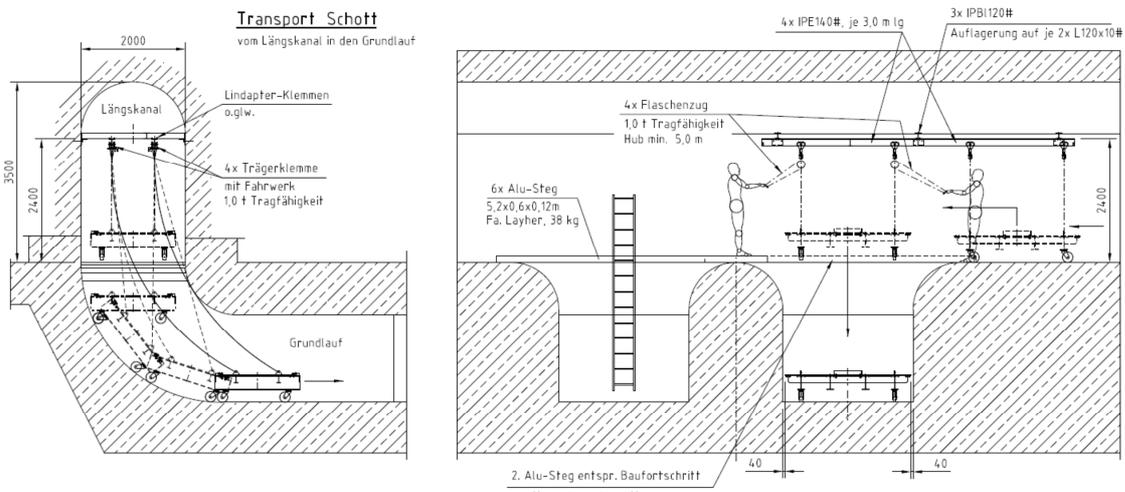


Bild 32: Schotttransporte

Zuwegungen

Die Zuwegung zum Längskanal Ost für Material, Geräte und Personen erfolgte durch die Schächte der nicht verschlossenen kammerseitigen Revisionsverschlüsse.

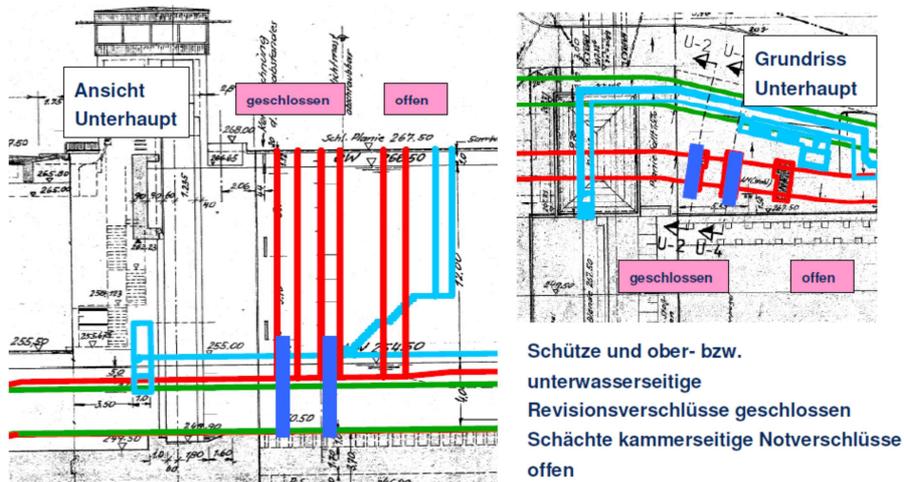


Bild 33: Zuwegung zum Längskanal

Im Längskanal war ein Personen- bzw. Materialtransport über ca. 170 m Länge notwendig. Ein zweiseitiger Zugang mit doppeltem Rettungsweg war vorhanden. An einem Zugangsschacht war ein Personenfahrkorb installiert.



Bild 34: Personenfahrkorb im Längskanal



Bild 35: Personenfahrkorb im Schacht

Die Zuwegung zum Leerschuss konnte nur durch das Pumpenhaus über Rohrstützen nicht mehr genutzter Pumpenanschlussrohre erfolgen. Diese haben einen Durchmesser von 1 Meter und wurden als Mannlöcher ausgebaut.



Bild 36: Rohrstutzen im Pumpenhaus

Die vorhandene Standebene hinter den Mannlöchern liegt ca. 2 m unter der Rohrsohle. Hier wurden eine Plattform und eine Treppe installiert.

Vorbereitungsmaßnahmen

Um die vorhandene Bewehrung durch die Bohrarbeiten nicht zu beschädigen, wurde diese im Längskanal und im Leerschuss vorher mittels Radar geortet und durch Suchschlitze, die mit einem Hochdruckwasserstrahl-Roboter hergestellt wurden, erkundet. Die so erkundete Bewehrung wurde an jeder Bauteiloberfläche gekennzeichnet und auf einem Plan für beide Bauteiloberflächen dargestellt. Entsprechend Lage der vorhandenen Bewehrung wurde die Lage der Bohrlöcher festgelegt und am Bauteil gekennzeichnet. Durch vermessungstechnische Aufmaße wurde der Bezug der Blockfugen im Längskanal und im Leerschuss hergestellt.

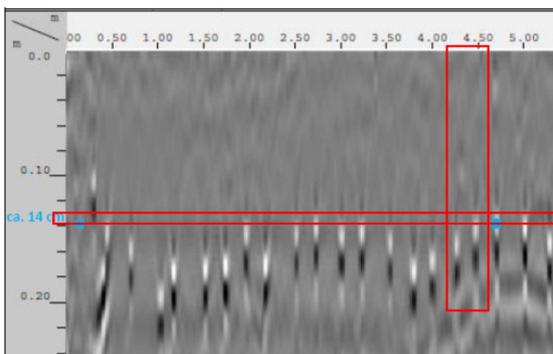


Bild 37: Radarmessung Bewehrungsortung



Bild 38: HDW-Roboter für Suchschlitz



Bild 39: Bewehrung im Suchschlitz



Bild 40: Kennzeichnung vorh. Bewehrung

Einbau der Verstärkungsbauteile

Zum Einbau der Konstruktion sind folgende Arbeitsabläufe vorgesehen:

- Kernbohrungen Du 50 mm
- Aufrauen des Bohrlochs mit Hochdruckwasserstrahl
- Vorbereitung der Spannstäbe mit Abstandhaltern und Einbau in die Bohrlöcher
- Aufsetzen der Stahlplatten, Fixierung im Dünnbettmörtel und Anzug der Muttern
- Vorspannung mittels Spannpresse
- Festlegung der Muttern und Anzug der Kontermuttern
- Aufsetzen der Verpresskappen und Bohrlochverpressung



Bild 41: Kernbohrgerät

Die Bohrlöcher wurden vom Längskanal aus in Richtung Leerschuss hergestellt. Der Einbau der Spannstäbe, das Aufbringen der Vorspannung und die Verpressung des Bohrlochs erfolgten ebenfalls vom Längskanal aus.

Bauteil 2 - Stahlbetonfertigteile Drainagegang

Zuwegungen

Der Drainagegang ist über Treppen im Oberhaupt zugänglich. Weitere Zuwegungen sind ein vorhandener Schacht am Oberhaupt, ein Revisionschacht ca. in Kammermitte und ein weiterer Schacht mit Treppe am Unterhaupt. Somit waren ausreichende Möglichkeiten für einen Personen- bzw. Materialtransport vorhanden.

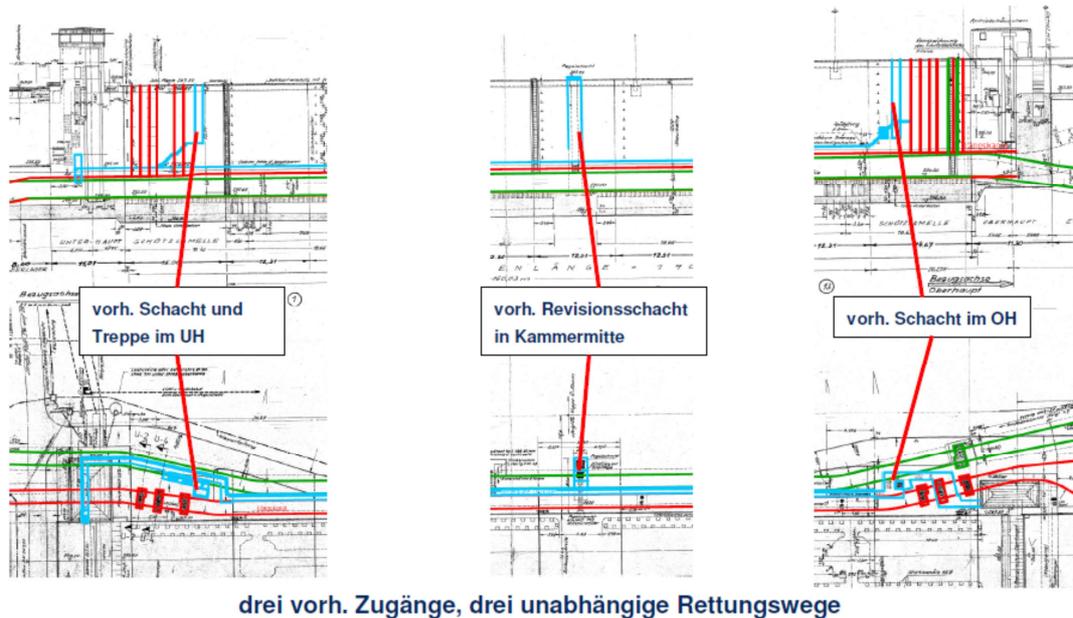


Bild 42: Zuwegungen zum Drainagegang

Bauablauf

- Ausbau der vorhandenen Holzsteifen und Umsteifung auf Montagerüststeifen
- Rückbau der Betonschwelle
- Verpressung der Risse in den Betonhalbschalen
- Aufräuen der Betonoberfläche mittels HDW-Roboter
- Abdämmen der Sickerschlitze zwischen den Betonhalbschalen zur lokalen Zurückhaltung des Drainagewassers
- Abschalen der Seiten zu den Sickerschlitzen
- Hammerbohrungen und Anschlussbewehrungseinbau
- Einbau der kreuzweisen Oberflächenbewehrung
- Spritzbetonaufbringung



Bild 43: Packer zur Rissverpressung



Bild 44: HDW-Roboter im Drainagegang

Bauteil 3 - Kammerwand Drainagegangbereich

Die Zuwegungen sind die gleichen wie für Bauteil 2

Vorbereitungsmaßnahmen

- Einbau von lokalen Wasserhaltungsmaßnahmen zur Freihaltung der Arbeitsbereiche von Drainagewasser
- Packer für Rissverpressung setzen; Verdämmung in First im Längskanal
- Rissinjektion mit Polyurethan
- Bewehrungsortungen in Kammerwand und Drainagegangsohle
- Bewehrungssuchschlitze
- Kennzeichnen der erkundeten Bewehrung am Bauteil
- Bewehrungsdarstellung für jede Lamelle
- Festlegung der Zusatzbewehrungseinbauorte und Kennzeichnung am Bauteil
- Herstellung von Bohrständen zur maßhaltigen Bohrlochherstellung

Bauablauf

- Kernbohrungen in Kammerwand und Sohle Drainagegang
- Bohrlochaufrauung mit Hochdruckwasserstrahl
- Lochfüllung mit Hilti-Hit-Mörtel
- Muffenkopplung der Bewehrungsstäbe und Einsetzen in die Bohrlöcher
- Lagefixierung der Positionsmuffen
- Positionsmuffen nach Mörtelerhärtung spannungslos lösen
- Bewehrungs- und Schalungsarbeiten zur Herstellung der geplanten Stufe
- Schleusensperrung, Schleuse auf Oberwasser
- Spannungskopplung der Positionsmuffen; Betonage mit frühestem Beton während des Wasserstands auf Oberwasser
- Aushärtung des Betons
- Aufnahme des Regelschleusenbetriebs



Bild 45: Bohrständer mit Kernbohrgerät



Bild 46: Betonage Stufe

Arbeitssicherheit

Bei den Arbeiten in engen unterirdischen Gängen mit anfallendem Leckagewasser und Wasserdruck auf den Abschottungen sind folgende besondere Maßnahmen zum Arbeitsschutz eingesetzt worden:

Verschlüsse / Abschottungen

- Absperren der Hydraulik und Elektrik zur Bedienung
- Verkeilung der Verschlüsse
- Leckagemessungen

Zuwegungen / Personenrettung

- Persönliche Schutzausrüstung (Tragegurt, Helm, Brille, Gehörschutz, Handschuhe, Sicherheitsschuhe, Staubmaske)
- Abstellung eines Rettungspostens auf der Planie
- Einrichtung und Kennzeichnung von Sammelpunkten im Freien
- Rettungsübungen
- Rettungsseile zu den Ausgängen bzw. Rettungsschächten
- Fluchtwegkennzeichnungen
- Feuerlöscher
- Beschränkung der maximal zugelassenen Personenanzahl in den Kanälen
- Installation von Selbststrettern
- Vorhaltung von Schleifkorbtragen mit Abspannseilen
- Hubvorrichtungen (Dreiböcke) über den Rettungsschächten



Bild 47: Schleifkorbtrage



Bild 48: Dreibock

Beleuchtung

- | | |
|------------------------------|---------------|
| • Verkehrswege | mind. 50 Lux |
| • Arbeitsplätze, Ladestellen | mind. 200 Lux |
| • Stationäre Einrichtungen | mind. 120 Lux |

Atemluft

- Be- und Entlüftungskanäle zu den Arbeitsplätzen zur Versorgung mit Außenluft
- Messung der Sauerstoffkonzentration
- Messung eventueller Schadstoffkonzentrationen vor jedem Schichtbeginn

Stromversorgung

- Die Baustromversorgung sowie die Beleuchtung in den unterirdischen Gängen wurde während der Hauptbaumaßnahme generell mit Schutztrennung mittels galvanischer Trennung über einen Trenntransformator ausgeführt.
- Die Beleuchtung in den Gängen und im Grundlauf während der Schleusensperrung zur Herstellung der Grundlaufabschottung wurde mittels Kleinspannung realisiert.

Baukosten und Termine

Die Gesamtbaukosten betragen ca. 4,7 Mio EUR netto.

Die Planung und Ausführung wurde im Zeitraum zwischen April 2010 und Dezember 2012 durchgeführt. Dabei traten folgende Einzeltermine auf:

- | | |
|-------------------------------|---------------------|
| • Plaung (Lph 1 bis Lph 6) | 04/2010 bis 07/2011 |
| • Einbau Grundlaufabschottung | 04/2011 |
| • Instandsetzungsmaßnahmen | 10/2011 bis 12/2012 |

Hannover, im Oktober 2013