

Betonanforderungen und Beton-technologie beim Neubau der Doppelschleuse Hohenwarthe am Wasserstraßenkreuz Magdeburg

Von André Weisner, Magdeburg

1 Einleitung – Das Wasserstraßenkreuz Magdeburg

Im Rahmen der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“ umfasst das Projekt Nr. 17 den Ausbau der Wasserstraßenverbindung von Hannover nach Berlin. Es stellt damit die Verbindung der großen holländischen Häfen und der deutschen Häfen des Ruhrgebiets mit der Bundeshauptstadt und darüber hinaus bis zur Oder her. Das Projekt ist dadurch wichtiger Bestandteil eines trans-europäischen Binnenwasserstraßen-netzes. Der Ausbau erfolgt für moderne Großmotorgüterschiffe mit 110 m und Schubverbände mit 185 m Länge, 11,40 m Breite und 2,80 m Abladetiefe. Die Bemessungsschiffe haben dabei 2.000 t bzw. 3.500 t Tragfähigkeit. Die Wasserstraße soll auf eine Breite zwischen 42 m und 55 m bei einer Wassertiefe von 4 m ausgebaut werden.

Die Großräume Magdeburg und Berlin erhalten damit eine leistungsfähige, sichere und umweltfreundliche Wasserstraßenverbindung auf west-europäischem Niveau und verfügen so über zukunftsorientierte und wettbewerbsfähige Standortbedingungen. Magdeburgs Infrastruktur gewinnt durch die Kreuzung der drei Verkehrswege Schiene, Straße und Wasserstraße jeweils in den Ost-West- und Nord-Süd-Magistralen erheblich an Bedeutung.

Kernstück der Wasserstraßenverbindung Hannover-Magdeburg-Berlin ist zweifellos das Wasserstraßenkreuz Magdeburg (Bild 1).

Bereits 1919 gab es erste Entwürfe und vor dem zweiten Weltkrieg Planungen einer Verbindung des Mittellandkanals mit dem Elbe-Havel-Kanal bei Magdeburg. Mit der Bauausführung der dafür notwendigen rund 1.000 m langen Kanalbrücke über die Elbe, einer Kanalstrecke östlich der Elbe und eines Doppelhebewerks bei Hohenwarthe ist in den 30er Jahren begonnen worden. Die Bauwerke wurden jedoch wegen des Kriegs 1942 nicht fertig gestellt. Lediglich der Anschluss an die Elbe

konnte 1938 mit der Fertigstellung des Schiffshebewerks Rothensee vollendet werden.

Um vom Mittellandkanal in den Elbe-Havel-Kanal zu gelangen, müssen die Schiffe auch heute noch einen Umweg von 12 km über die Elbe gegenüber der direkten Querung fahren. Dies geschieht per Abstieg entweder über die bereits 2001 fertig gestellte Schleuse Rothensee oder das Schiffshebewerk und den Rothenseer Verbindungskanal (Bild 2), dann Elbe abwärts und über die Schleuse Niegripp in den Elbe-Havel-Kanal. Bei oft wochenlangen Niedrigwasserständen müssen die Schiffe aus Richtung Hannover in Magdeburg leichtern, nicht selten muss der Schiffsverkehr ganz eingestellt werden.

Zudem kann das Schiffshebewerk Rothensee aufgrund seiner Trogabmessungen von nur 85 m Länge keine Großmotorgüterschiffe aufnehmen.

Mit dem Bau des Wasserstraßenkreuzes Magdeburg soll nun eine ganzjährige, wasserstandsunabhängige Elbequerung sowie eine ganzjährige vollschiffige Anbindung der Magdeburger Häfen an den Mittellandkanal erreicht werden. Die



Bild 1: Das Wasserstraßenkreuz Magdeburg



Bild 2: Blick vom Mittellandkanal in den Rothenseer Verbindungskanal; links das Schiffshebewerk (Baujahr 1938), rechts die 2001 freigegebene Sparschleuse Rothensee gegen Ende der Bauzeit

Schleuse Rothensee, die Kanalbrücke (Bild 3) und die Streckenlose wurden bereits fertig gestellt. Die Hafenan-

bindung und der damit verbundene Bau der Schleuse Magdeburg wird 2004 ausgeschrieben.

Bei der Errichtung der Ingenieurbauwerke am Wasserstraßenkreuz wurden neben vielen anderen Baumaterialien insgesamt über 336.000 m² Schalung gesetzt und rd. 533.000 m³ Beton eingebaut.



Bild 3: Kanalbrücke, bestehend aus der Vorlandbrücke (690 m) und der Strombrücke (228 m)

2 Konstruktion und Funktion der Doppelsparschleuse Hohenwarthe

Die Schleusenanlage (Bilder 4a und 4b) bildet das östliche Ende der Mittellandkanalhaltung Sülfeld-Hohenwarthe. Die Schiffe überwinden bei der Schließung bei Normalwasserstand der Kanäle einen Höhenunterschied von 18,55 m. Unter dem Gesichtspunkt, den Wasserverbrauch und damit die Kosten für das Zurückpumpen des Betriebswassers zu reduzieren, ist die Schleuse Ho-

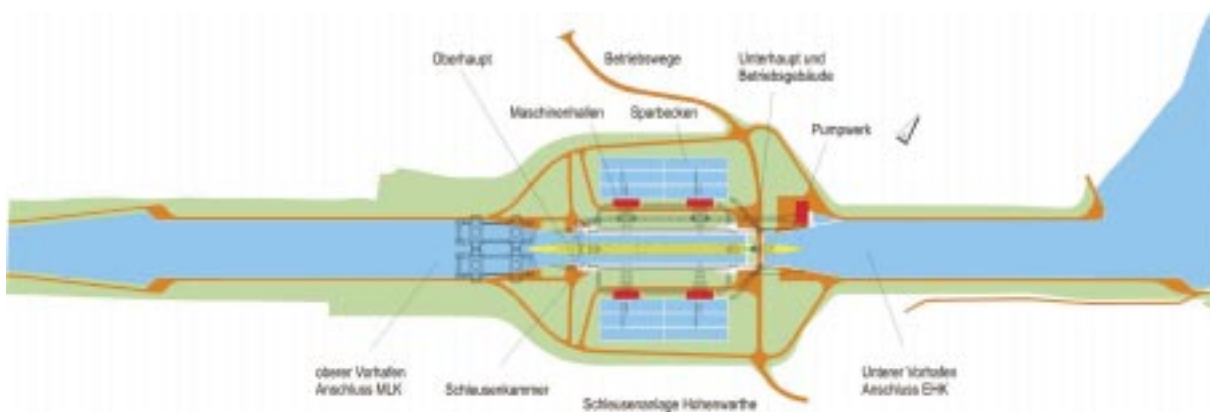


Bild 4a: Schleuse Hohenwarthe - Lageplan



Bild 4b: Schleuse Hohenwarthe - Bauzustand

henwarthe als Sparschleuse konzipiert worden. Hierdurch wird eine Einsparung von rd. 60 % des Schleusenbetriebswassers möglich. Nur rd. 40 % des Kammerinhalts werden bei einer Bergschleusung der oberen Haltung entnommen und bei einer Talschleusung in die untere Haltung

abgeleitet. Dieses „Verlustwasser“ muss durch Rückpumpen in die obere Haltung wieder ersetzt werden. Dafür stehen drei Pumpen mit einer Nennfördermenge von jeweils 3,5 m³/s zur Verfügung. Die Schleusenanlage besteht im Wesentlichen aus den Vorhäfen, den

Einfahrtbereichen, dem Ober- und Unterhaupt, den zwei Kammern, den zu beiden Seiten übereinander angelegten je drei Sparbecken, den Maschinenhallen, dem Schleusenbetriebsgebäude, dem Pumpwerk im Unterwasser sowie der nötigen Infrastruktur. Jede Schleusenammer weist



Bild 5: Blick in die Nordkammer, Kammerwandhöhe 24,45 m

eine nutzbare Länge von 190 m auf und ist 12,50 m breit (Bild 5). Eine ebenso breite Mittelmole trennt die beiden Schleusenkammern. Die 24,45 m hohen Kammerwände sind in Längsrichtung in 14 durch Dehnfugen getrennte Lamellen (Bild 6) aufgeteilt.

Die Schleuse ist auf 1.248 Ortbetonpfähle mit einem Durchmesser von 90 cm und einer mittleren Länge von rund 16 m gegründet (Bilder 7 und 8). Die darüber liegende 5,50 m dicke Sohle aus Stahlbeton ist vom Unterhaupt zum Oberhaupt über



Bild 6: Schleusenkammern und Mittelmole mit Dehnfugenabständen von 13,25 m und einer Fugenbreite von 3 cm.

eine Länge von 246,5 m fugenlos ausgebildet (Bild 9). Die monolithische Konstruktion vergleichmäßig die auftretenden Setzungsdifferenzen und ist damit Voraussetzung für das Erzielen einer zulässigen Fugenverformung in den Kammerwänden. Die Lamellen der Ein- und Ausfahrtbauwerke sind im Sohlbereich durch Raumfugen von den Hauptern getrennt. Die Fugenbreiten betragen dabei bis zu 14 cm. In diesen Bereichen kamen auswechselbare elastomere Omega-Dehnfugenbänder zum Einsatz.

Bei den zu beiden Seiten der Schleusenkammern terrassenförmig übereinander gestaffelten und flach gegründeten Sparbecken, die jeweils 167 m lang und 15,50 m breit sind, werden die Sohlplatte und Wände nach einem Sondervorschlag der ausführenden Arge ebenfalls monolithisch hergestellt. Die Schleusenkammern sind durch je zwei fugenbehaftete Zulaufkanäle mit den Sparbecken gelenkig verbunden (Bild 10).

Das Konstruktionsprinzip, die Sparbecken konstruktiv von der als Doppel-U-Rahmen geplanten Kammer zu trennen, entspricht im Wesentlichen dem Prinzip der Schleusen des zweiten Kanalabschnitts des Main-Donau-Kanals. [1]

Die Doppelsparschleuse Hohenwarthe erhält als Verschluss im Oberhaupt der beiden Schleusenkammern ein torsionssteifes Zugsegmenttor. Der Antrieb erfolgt mit einem einseitigen hydraulischen Antrieb über ein Torsionsrohr mit angeflanschter Antriebsscheibe.

Im Unterhaupt werden die beiden Hubtore beidseitig hydraulisch angetrieben. Das Heben und Senken der Tore erfolgt mit direkt auf der Planie aufgestellten Hydraulikzylindern ohne Gegengewichtsausgleich. Dieses Antriebsverfahren wird erstmalig für Schleusentore eingesetzt.

Ab Oktober des Jahres 2003 wird die Schifffahrt mit Fertigstellung der

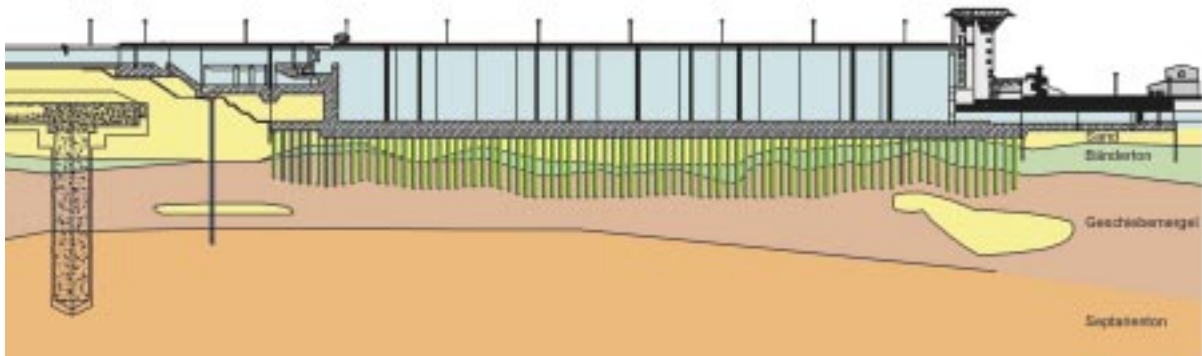


Bild 7: Längsschnitt Schleuse Hohenwarthe mit Pfahlgründung und Baugrunderdarstellung



Bild 8: Querschnitt Schleuse Hohenwarthe



Bild 10: Sparbecken-Zulaufkanal; Block 1 im Bauzustand mit beidseits angeordneten auswechselbaren Omega-Dehnfugenbändern



Bild 9: Dehnfugenlose Gründungssohle – Länge: 246,5 m; Breite: 54,1 m bis 65,0 m; Dicke: 5,5 m

Tafel 1: Wesentliche Materialmengen für den Schleusenrohbau

Einphasendichtwand	44.800 m ²
Baugrubenverbau	7.800 m ²
Erdbau	1.600.000 m ³
Stahlspundwand	20.000 m ²
Großbohrpfähle	1.300 St.
Stahlkonstruktion	2.000 t
Straßen- und Wegebau	8.000 m
Beton	320.000 m ³
Schalfläche	180.000 m ²
Bewehrungsstahl ohne Pfähle	33.000 t

Doppelsparschleuse Hohenwarthe erstmals das Wasserstraßenkreuz Magdeburg passieren können.

Tafel 1 enthält einige Angaben über die für den Rohbau erforderlichen Materialmengen der Schleusenanlage Hohenwarthe.



Bild 11: Einlaufbauwerk mit beidseitig angeordneten Längskanälen. Im Hintergrund die Behelfsbrücke über die Südkammer zur Ausführung von Erd- und Betonarbeiten auf der Mittelmole

3 Anforderungen an die Stahlbetonkonstruktion der Schleusenanlage Hohenwarthe

Die Schleusenanlage Hohenwarthe erfährt durch ihr großes Eigengewicht (rd. 650.000 t aus Stahlbeton, rd. 100.000 t aus Wasser) und der Last aus den hohen und flächigen Anschüttungen von 1.600.000 t eine enorme statische Beanspruchung. Die statische Belastung der Gründungsfläche liegt etwa bei 2,3 Mio. t.

Der Schleusungsvorgang in den Kammern und in den Sparbecken verursacht ferner Wechsellasten (nicht vorwiegend ruhende Belastung). Bei einer Schleusung werden rd. 47,8 Mio. l Wasser je Kammer bewegt. Der Durchfluss erreicht in den Sparbeckenzuläufen 120 m³/s und in den Längskanälen (Bild 11) 70 m³/s. Der Vorgang erfolgt bis zu 16-mal täglich!

Tafel 2: Bauwerksbezogene Anforderungen an den Beton

Bauteil Bauwerksteil	Festigkeitsklasse			hoher Frost- widerstand	hoher Frost- und Tausalz- widerstand	hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff
	B 25	B 25 LP (w/z) _{eq} ≤ 0,5	B 35			
Wände in der Wasserwechselzone bis 0,50 m unter Planie		X		X		X
Wände, die ständig unter Wasser stehen	X					X
Sohlplatten von OW bis UW	X					X
Sohlplatten und Wände von Sparbecken		X		X		X
Planiebereiche, Brückenwiderlager		X			X	
Bauteile ohne Wasserkontakt	X					X
Schleusenbetriebsgebäude			X			

Tafel 3: Zusammensetzung einiger wesentlicher Betone

Bauwerk		Schleuse Hohenwarthe		
Bauteil		Sohle Schleuse	Sohlen Sparbecken Kammerwände	Wände Sparbecken Planie Schleusenammer
Betonfestigkeitsklasse		B 25	B 25	B 25
besondere Eigenschaften		Wasserundurchlässigkeit, hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff	Wasserundurchlässigkeit, hoher Frostwiderstand, hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff	Wasserundurchlässigkeit, hoher Frost- und Tausalz-widerstand, hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff
Konsistenz		F3	F3	F3
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM III/A 32,5 – NW/NA	CEM III/A 32,5 – NW/NA	CEM I 32,5 R
Zementgehalt z	kg/m ³	240	270	350
Wassergehalt w/z	kg/m ³	150	140	168
(w/z) _{eq}		– 0,57	– 0,47	0,48 –
Gesteinskörnungen Vorkommen und Art		Raum Magdeburg Rundkorn 0/2, 2/8 Harz Splitt 8/16, 16/32	Raum Magdeburg Rundkorn 0/2, 2/8 Harz Splitt 8/16, 16/32	Raum Magdeburg Rundkorn 0/2, 2/8 Harz Splitt 8/16, 16/32
Sieblinie		AB 32	AB 32	AB 32
Gehalt	kg/m ³	1851	1876	1740
Zusatzstoff Art		Steinkohlen- flugasche	Steinkohlen- flugasche	–
Gehalt	kg/m ³	110	80	–
Zusatzmittel Art		VZ	FM/BV	LP
Gehalt	% v. z	0,9	0,8	0,35

Zur üblichen statischen Beanspruchung der Schleusenanlage kommt hinzu, dass der Standort der Schleusenanlage durch eine sehr inhomogene Baugrundsichtung und eine auf Wechsellasten empfindlich reagierende Gründungsschicht gekennzeichnet ist (Bild 7). Weiterhin wirkt sich das im direkten Einfahrtbereich rd. 70 m tief gegründete Doppelhebewerk, das 10 m überschüttet wurde (Bild 7, links), negativ auf die Gründungssituation aus. Aufgrund einer geologischen Störzone westlich der Anlage und der geographischen Begrenzung im Osten durch den Niegripper Verbindungskanal blieb dem Bauherrn jedoch kein Alternativstandort.

Der Zwangsbeanspruchung aus Setzung kam daher für die monolithische Sohle besondere Bedeutung zu. Grundlage für die Bemessung der Sohlplatte war folglich die Setzungsberechnung aus Lastbeanspruchung mit der aus den Verformungen resultierenden Momentenbeanspruchung der Sohlplatte. Für die Zwangsbeanspruchung aus abfließender Hydratationswärme ist zusätzlich für den gesamten Bauablauf eine instationäre Wärmeberechnung durchgeführt worden. Die Berechnungen erfolgten für die Kammerblöcke an ebenen Systemen und für das Ober- und Unterhaupt an räumlichen Systemen. Die daraus resultierende Zwangsbeanspruchung

wurde der Zwangsbeanspruchung aus Setzung überlagert. Das Ingenieurbauwerk ist für eine Lebensdauer von 80 Jahren konzipiert. Daraus folgen hohe Anforderungen an die Konstruktion, insbesondere an die Tragfähigkeit, die Ermüdungsfestigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und an die Dauerhaftigkeit des Betons (Tafel 2).

4 Anforderungen an die Ausgangsstoffe und deren Umsetzung

4.1 Zement

Die technischen Randbedingungen, die für den Zement vom Auftrag-

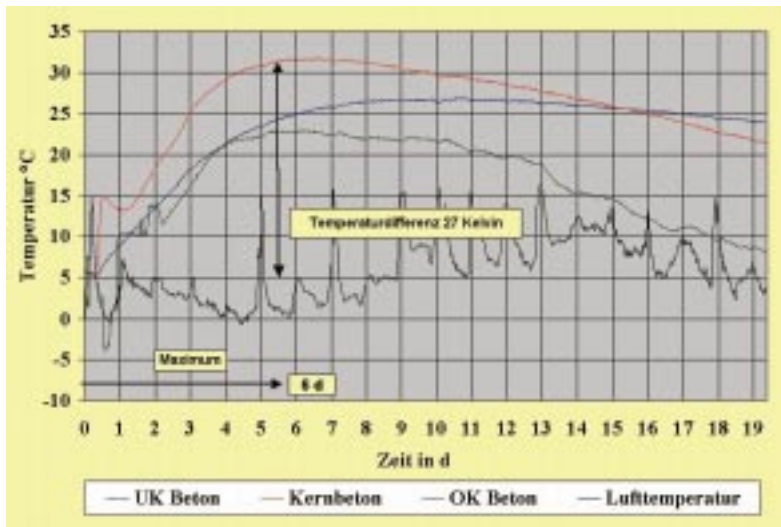


Bild 12: Im Bauteil gemessene Temperaturentwicklung Sohlbeton Sorte 2, Sohle S1, 16.11.99, CEM III/A 32,5 (240 kg/m³)

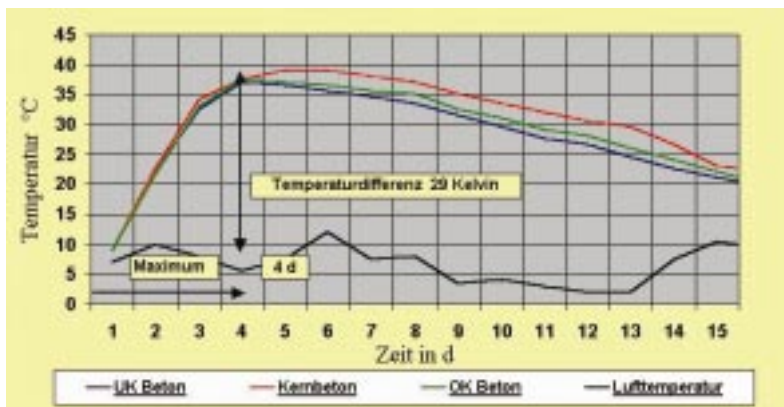


Bild 13: Im Bauteil gemessene Temperaturentwicklung Wandbeton Sorte 4, Oberhaupt, Torlamelle, 10.02.00, CEM III/A 32,5 (270 kg/m³)



Bild 14: Schleusenbetriebsgebäude am Unterhaupt; rechts im Bild Blick auf die Tormaske der Südkammer

geber vorgegeben wurden, zielten in erster Linie auf die Begrenzung der Wärmeentwicklung bei Massenbeton ab.

Seitens des Auftragnehmers wurden mit 240 kg/m³ für den Sohlbeton und 270 kg/m³ für den Kammerwandbeton Zementgehalte an der unteren Grenze der Normvorgabe gewählt.

Bei der Wahl der Zusammensetzung des Betons für die Erstellung von massigen Bauwerken ist die sichere Vermeidung von Rissen aus innerem und äußerem Zwang, insbesondere durch die Temperaturbeanspruchung während der Hydratation, die wichtigste Anforderung [2]. Für alle massigen Bauteile sollten Hochofenzement

CEM III/A 32,5 oder Hochofenzement CEM III/B 32,5 – NW/HS verwendet werden. Die Hydratationswärmeentwicklung des Zements durfte dabei 230 J/g nach 7 Tagen nicht überschreiten.

Zum Einsatz kam für die massigen Bauteile ein hüttsandreicher Hochofenzement CEM III/A 32,5-NW/NA (Tafel 3). Die verschärften Anforderungen zur Begrenzung der Hydratationswärmeentwicklung unter der Normanforderung von 270 J/g nach 7 Tagen (NW-Kriterium) [3] konnte mit dem Normzement erreicht werden. Der in der Eignungsprüfung festgestellte Wert lag mit 216 J/g nach 7 Tagen noch deutlich unter dem geforderten Wert.

Die im Rahmen der Güteprüfung durchzuführenden automatischen Messungen im Rand- und Kernbereich des Bauteils bestätigten die günstige Entwicklung und die Größenordnung der Hydratationswärme (Bilder 12 und 13).

Portlandzement wurde nur für die Hochbauteile des Schleusenbetriebsgebäudes (Bild 14), beim Brückenüberbau, bei den Sparbeckenwänden und bei der Schleusenplanie, für die ein hoher Frost- und Tausalwiderstand gefordert war, eingesetzt. Ferner wurde für die Zweitbetonbereiche (Bild 15) ein CEM III/B-S verwendet, da dieser im Hinblick auf den Widerstand gegen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion auch bei hohen Zementgehalten, die für diese Zweitbetone mit einer Festigkeitsklasse B35 erforderlich waren, günstige Eigenschaften besitzt.

Für den Verklammerungsbeton für die Schüttsteinsicherung in den Vorhäfen und Einfahrtsbereichen wurde



Bild 15: Torlamelle Oberhaupt; Zweitbetonbereiche für das Zugsegmenttor sind bewehrt und werden später ausbetoniert (größere Genauigkeitsanforderungen)



Bild 16: Oberer Vorhafen; Einbringen von Verklammerungs-beton im Bereich der Liegeflächen auf einer Breite von 12 m (Teilverguss: 90 l/m², Vollverguss: 180 l/m²)

ein CEM II A-LL eingesetzt (Bild 16). Alle Zemente wurden aus einem Zementwerk geliefert.

Erste Untersuchungen und Risskartierungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zu den Kammerwänden und Sparbeckenwänden zeigten keine Risse über 0,25 mm.

Die in die statische Berechnung eingeflossene Rissbreitenbeschränkung wurde somit auch am Bauwerk eingehalten und zeigt, dass neben der Bewehrungsführung, dem Schalungs- und Nachbehandlungskonzept auch die Betontechnologie zu diesem technisch positiven Ergebnis führte.

4.2 Zusatzstoffe und Zusatzmittel

Aus Qualitätsgründen durfte nur Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 eines Herstellers und von einem Kraftwerksblock verwendet werden. Von diesem waren entsprechende Mengen Flugasche vorzuhalten, um Ausfallzeiten zu überbrücken. Die Flugasche wurde mit einem k-Wert von 0,4 auf den w/z-Wert angerechnet. Als Zusatzmittel kamen Betonverflüssiger, Fließmittel, LP-Bildner, Verzögerer und Einpresshilfen zum Einsatz. Bei gleichzeitiger Verwendung mehrerer Zusatzmittel wurden diese auf Verträglichkeit

miteinander geprüft. Dies galt auch für die Verträglichkeit mit dem verwendeten Zement. Gleichzeitig eingesetzte Zusatzmittel durften nur von einem Hersteller stammen.

Besonderes Interesse, insbesondere bei den Großbetonagen, galt dem Ein-

satz von Verzögerer. Bei den Betonagen der 14 Sohlabschnitte waren Mengen zwischen 1.500 m³ und 6.900 m³ in 5 bis 6 Lagen bei Abschnittshöhen von 2,50 m (Bild 17) und 3,00 m einzubauen. Um ein Vernadeln mit der darunter



Bild 17: Senkrechte mit Streckmetall abgestellte Arbeitsfuge eines 2,50 m hohen Betonierabschnitts der Sohle

Tafel 4: Verarbeitbarkeitszeiten in Abhängigkeit von der Verzögererzugabemenge

Frischbetontemperatur	Nullbeton	0,3 % vom Zementgeh.	0,6 % vom Zementgeh.	0,9 % vom Zementgeh.
10 °C	2,5 h	4,5 h	5,5 h	8,0 h
20 °C	3,5 h	6,0 h	8,0 h	11,0 h
25 °C	5,0 h	9,0 h	12,0 h	16,0 h

liegenden Schicht sicherzustellen, war eine Verlängerung der Verarbeitbarkeitszeit erforderlich. Ausgehend vom Nullbeton konnten die in Tafel 4 dargestellten Werte für die Sohlbetonzusammensetzung erreicht werden.

Für die relativ schlanken Sparbeckenwände ($\leq 1,00$ m) und die Planie wurde eine Betonzusammensetzung mit hohem Frost- bzw. Frost- und Tausalzwidestand mit einem CEM I 32,5 R unter Zugabe von Luftporenbildner eingesetzt. Die Luftporen mussten in Abhängigkeit vom Mehlkorngesamt am Einbauort in einem Bereich von 4 Vol.-% bis 6 Vol.-% liegen. Um eine gleichmäßige Produktion sicherzustellen, wurde die Prüfung jedes Fahrzeugs auf der Baustelle verlangt.

4.3 Gesteinkörnungen

Das Bauwerk muss in durchfeuchtem Zustand häufigen Frost-Tauwechseln sicher widerstehen. Für Beton mit hohem Frostwidestand und hohem Frost- und Tausalzwidestand waren Gesteinskörnungen zu verwenden, bei denen bei Prüfung nach DIN 4226 Teil 3, Abschnitt 3.5.3, der Durchgang durch das Prüfsieb 1 M.-% nicht überschritten wird. Ferner durften nur Gesteinskörnungen verwendet werden, die hinsichtlich der Alkalireaktion als unbedenklich (EI) einzustufen waren.

Durch ein petrographisches Gutachten war nachzuweisen, dass Einlagerungen von leichten Gesteinskörnungen (poröser Kalkstein, Kreide, stark kreidige Flinte) und andere schädliche Bestandteile in der Lagerstätte, unter Auswertung der Er-

kenntnisse und Erfahrungen aus dem bisherigen Betreiben der Lagerstätte, ausgeschlossen waren. Ergänzend zur Prüfung und Güteüberwachung nach DIN 4226 galt die Verfügung V-7/97-44 des Landesamts für Straßenbau Sachsen-Anhalt [4].

Die Sieblinie musste stetig sein und zwischen den Sieblinien A 32 und B 32 verlaufen. Die Wahl der Lagerstätte zur Gewinnung der Gesteinskörnungen war zustimmungspflichtig. Verwendet wurden Rundkorn aus dem Raum Magdeburg (0/2 mm, 2/8 mm) und Splitt aus der Grube Dittfurt im Harz (8/16 mm, 16/32 mm). Die erhöhten Anforderungen konnten gutachterlich nachgewiesen werden und wurden im Rahmen von halbjährlichen Prüfungen bestätigt.

4.4 Anmachwasser

Die Herkunft und Eignung war gemäß Bauvertrag nachzuweisen, sofern es sich nicht um Trinkwasser handelte. Da im Betonwerk auf der Baustelle Brunnenwasser verwendet wurde, erfolgte die Prüfung nach dem „Merkblatt für Zugabewasser für Beton“ des DBV [5]. Hierbei ergaben sich auch bei Wiederholungsuntersuchungen keine Besonderheiten.

5 Anforderungen an den Beton

Für das Bauwerk wurde ein Beton mit besonderen Eigenschaften gefordert. Das Anforderungsprofil wurde im Wesentlichen durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) konzipiert. Für die Herstellung dieses Betons galten die Bedingungen für

Beton B II, und zwar unabhängig von der geforderten Festigkeitsklasse. Alle Betone B25 und höherwertig mussten als wu-Beton gemäß DIN 1045 mit erhöhten Anforderungen ($w_u \leq 30$ mm) zusammengesetzt sein.

Die Betonzusammensetzungen waren mit dem Bauherren vor Beginn der Betonarbeiten abzustimmen und in Eignungsprüfungen die geforderten Eigenschaften nachzuweisen. Die Freigabe behielt sich der Auftraggeber vor.

Die Betonsorten waren nach den geforderten Eigenschaften wie

- Druckfestigkeit
- hoher Frostwidestand
- hoher Frost- und Tausalzwidestand
- hoher Widestand gegen schwachen chemischen Angriff (grundwasserbedingt)
- Verarbeitbarkeit, Konsistenz unter Berücksichtigung der zu erwartenden Temperatur und der Verarbeitungszeit

einzuteilen, wobei die Zusammenlegung mehrerer geforderter Eigenschaften in eine Betonsorte anzustreben war.

Neben den „normalen“ betontechnologischen Anforderungen, die sich aus Statik, Beanspruchung und Dauerhaftigkeit ergaben, waren vor allem die Besonderheiten und Eigenschaften von Massenbeton wesentlich für die Konzeption des Betons. Weiterhin waren die Wasserundurchlässigkeit des Bauwerks und die überdurchschnittliche Beanspruchung durch Frost-Tauwechsel, insbesondere in der Wasserwechselzone der Sparbecken und der Schleusenkammern, wesentliche Merkmale.

Die Massenbetone waren so zu planen und auszuführen, dass alle Anforderungen an die Betoneigenschaften erreicht werden. Diese Problemstellung stellt eine gewisse Gratwanderung bei der Aufstellung der Betonzusammensetzungen dar.

6 Anforderungen an den Frischbeton

Das angestrebte Ausbreitmaß lag bei den Konstruktionsbetonen bei 45 cm (F3) nach 30 Minuten (Berücksichtigung der Fahrzeit vom Lieferwerk in Magdeburg zur Baustelle) mit einer zulässigen Toleranz von 3 cm (Tafel 5). Bei den Pfahl-, Zweit-, Verguss- und Verklammerungsbetonen galten andere Konsistenzbereiche und -toleranzen. Gemäß QS-Handbuch wurde neben der augenscheinlichen Kontrolle mindestens bei jedem fünften Fahrzeug die Konsistenz geprüft (etwa 7.100 Prüfungen). In gleicher Anzahl wurde die Frischbetontemperatur ermittelt. Die Betontemperatur musste im Bereich von +5 °C bis +25 °C liegen. Bei Lufttemperaturen < 5 °C muss die Frischbetontemperatur bei Betonen mit NW-Zementen mindestens 10 °C betragen. Im Winter 1999/2000 war daher das Beheizen der Gesteinskörnungen erforderlich. In den Sommermonaten wurden die Großbetonagen dagegen in den Abend- und Nachtzeitraum gelegt, um Temperaturproblemen vorzubeugen.

Der LP-Beton für die Sparbeckenwände (Bild 18) und die Schleusenplanie wurden im Wesentlichen in Lieferwerken in Magdeburg hergestellt. Für jedes Fahrzeug wurden LP-Prüfungen auf der Baustelle vereinbart. Um das „Vorhaltemaß“ zwischen Betonannahme und Einbaustelle zu ermitteln, wurden mehrfach auf der Baustelle LP-Prüfungen an der Betonannahme und hinter der Betonpumpe durchgeführt. Das so ermittelte Vorhaltemaß betrug 1 Vol.-%. Daher wurde als Annahmekriterium bei der Entnahme des Betons aus dem Mischerfahrzeug 5 Vol.-% festgelegt, um den Mindestwert von 4 Vol.-% an der Einbaustelle sicherzustellen. Der Höchstwert an der Einbaustelle war begrenzt auf 6 Vol.-%, um die geforderte Festigkeit sicher zu erreichen.

Tafel 5: Ergebnisse der Eignungsprüfung

			Sohlbeton	Wandbeton frost- beständig	Wandbeton frostausz- beständig
Frischbeton	a_0	cm	49	53	50
	a_{30}	cm	45	48	ohne Prüfung
	a_{45}	cm	43	44	48
	LP-Gehalt	%	1,5	1,6	4,2
Festbeton	β_{7d}	N/mm ²	22	27,5	–
	β_{28d}	N/mm ²	36	40,5	38
	β_{56d}	N/mm ²	42	43,5	–



Bild 18: Betoneinbau im Bereich der Sparbeckenanlage; im Vordergrund die Maschinenhäuser, in denen der Zulauf aus den Sparbecken über Gleitschütze gesteuert wird

7 Hoher Frostwiderstand

Maßgebend für den hohen Frostwiderstand ist eine geeignete Betonzusammensetzung. Die Arge wählte entsprechend [3] eine Zusammensetzung mit einem $(w/z)_{eq} < 0,50$ und konnte dadurch auf die Zugabe von Luftporenbildner verzichten.

Die Prüfung wurde in Anlehnung an [6] durchgeführt, wobei die Lagerung der Prüfkörper der Nachbehandlungszeit der Bauteile ange-

passt wurde. Mittlerweile gibt es hierzu modifizierte Verfahrensbeschreibungen.

Als Prüfkriterium für das CIF-Verfahren wurde in der Baubeschreibung die mittlere Abwitterung nach 56 Zyklen $\geq 2.000 \text{ g/m}^3$ und der Abfall des dynamischen E-Moduls $\leq 30 \%$ festgelegt. Damit wurden die Bedingungen gegenüber der ZTV- Wasserbau LB 219 ($\leq 40 \%$) [7] verschärft.

Bei der Beanspruchung von Betonbauteilen im Süßwasser durch Frost

sind erfahrungsgemäß Rissbilder und Gefügeveränderungen im Inneren des Betons infolge Frosteinwirkung die maßgeblichen Kriterien [8].

Im Bereich der frostbeanspruchten Schleusenkammerwände wurde ein Beton ohne Luftporen eingebaut mit 270 kg CEM III/A 32,5-NW/NA und 80 kg Flugasche je m³ Beton. Die Anforderung an den äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ unter Anrechnung der Flugasche wurden mit $\leq 0,5$ im Bauvertrag vorgegeben. Im Zuge der Eignungsprüfungen vor Baubeginn ist der Grenzwert auf $\leq 0,47$ und eine maximale Gesamtwassermenge von 140 Liter/m³ Frischbeton verschärft worden.

Hinsichtlich der Abwitterung und der Abnahme des dynamischen E-Moduls wurden die vertraglichen Anforderungen im Rahmen der Eignungs- und Güteprüfungen erfüllt (Bild 19). Vom Auftraggeber zusätzlich veranlasste CIF-Prüfungen unter Beteiligung mehrerer Institute zeigten allerdings streuende Ergebnisse.

Eine verschärfte Güteprüfung wurde zwischen den Vertragspartnern in

der Form vereinbart, dass bei jedem 10. Fahrzeug vor dem Einbau eine Darrprüfung nach DIN 1048 Teil 1 durchgeführt werden musste. Die über 650 Darrproben für den Kammerwandbeton mit hohem Frostwiderstand konnten die Einhaltung der Grenzwerte sicherstellen. Dabei wurde unabhängig hiervon die Kernfeuchte der Gesteinskörnungen nicht nur im Rahmen der Eignungsprüfung nachgewiesen, sondern auch vom Auftraggeber in der Produktion stichpunktartig geprüft. Durch die Bauüberwachung des Wasserstraßen-Neubauamts (WNA) Magdeburg wurde dabei der kleinste Wert der Kernfeuchteprüfungen als Abzugsmenge bei der Darrprobe vorgegeben, um so ein weiteres „Polster“ für das sichere Einhalten des äquivalenten Wasserzementwerts $(w/z)_{eq}$ auf der Baustelle zu schaffen.

8 Betoneinbau

Der Einbau des Betons erfolgte im Wesentlichen durch Autobetonpumpen mit 52 m Mastlänge (Bild 20). Dabei waren bei den gro-



Bild 20: Betoneinbau am Unterhaupt der Schleuse mit Autobetonpumpe 52 m

ßen Abschnitten der Sohle bis zu fünf Pumpen gleichzeitig im Einsatz, wobei eine Pumpe nur als Verteiler genutzt wurde. Nach Fertigstellung der Sohle und der ersten Wandabschnitte war die Erreichbarkeit der Mittelmole durch die 52 m-Auto-

Herstelldatum	Prüfinstitut	Prüfungsart	mittl. Abwitterung [g/m ²]	rel. dyn. E-Modul [%]
16.03.1999	RUB	Eignung	248	91
03.08.1999	RUB	Eignung	724	77
10.02.2000	RUB	1. Ringversuch	112	91
24.02.2000	RUB	Güteprüfung	474	70
13.09.2000	RUB	2. Ringversuch	510	82
18.10.2000	TU-H	Güteprüfung	98	83
Anforderung			≤ 2.000	≥ 70

Bild 19: Eignungsprüfungen und Güteprüfungen des Betons mit hohem Frostwiderstand per CIF-Verfahren



Bild 21: Betoneinbau mit Autobetonpumpe 52 m und 10 m Traverse im Bereich des Oberhauts

betonpumpe auch mittels 10 m Traverse (Bild 21) nicht mehr sichergestellt. Deshalb wurde je Kammer eine stationäre Pumpe am Unterhaupt installiert, die über 230 m mit einem schienengeführten Kranverteilungsmast verbunden wurde. Mit Kran und Kübel wurde der Beton nur bei kleinen Bauteilen eingebaut.

Alle Betonierarbeiten wurden von dem Betontechnologen der Bauüberwachung und zusätzlich von einem Vertreter der Arge Schleuse Hohenwarthe mit erweiterter betontechnologischer Ausbildung (E-Schein) auf der Baustelle überwacht.

9 Schalung und Nachbehandlung

Bei der Qualität der Betonoberflächen wurde unterschieden zwischen Sichtbetonflächen und Flächen, die mit fließendem Wasser in Kontakt kommen.

Für die unterschiedlichen Anforderungen wurde vor Beginn der Stahlbetonarbeiten eine Probewand betoniert. Dabei wurden verschiede-

ne Schalungsbeläge und biologisch abbaubare Trennmittel getestet.

Grundlage war ein vom Auftragnehmer ausgearbeitetes Schalkonzept, das im Rahmen der Arbeitsvorbereitung mit dem Neubauamt abgestimmt wurde.



Bild 22: Intensiver Schalungseinsatz unter Anwendung von Kletterschalung mit 6 Takten im Bereich der Kammer

Für die Sichtbetonflächen war zur Erzielung einer geschlossenen Betonfläche eine Schalung mit saugender Oberfläche zu verwenden. Kanten wurden mit Dreikantleisten gebrochen. Schalhautstöße und Anschlüsse waren dicht auszuführen. Dabei haben sich im Bereich von Stahleinbauteilen aufgeklebte Abdeckstreifen bewährt. Im Bereich der Kammerlamellen wurden in die waagerechten Arbeitsfugen Trapezleisten eingelegt, um „wilde“ Fugenbilder zu vermeiden.

Nach Vorschlag der Architekturabteilung der BAW wurden im Einfahrtbereich des Unterwassers einige Flächen mit Strukturschalung belegt. Die Brücken über das Unterhaupt erhielten eine scharrierte Schalung.

Da der Durchfluss des Schleusungswassers in den Längskanälen, Sparbeckenzulaufkanälen, Sparbeckennotüberläufen und im Pumpkanal u.a. von der Rauigkeit der Innenschalung wesentlich beeinflusst wird, wurden hier glatte Schalungsbeläge zur Ausführung (21 mm Sperrholzbelag, 15fach verleimt,



Bild 23: Schleusensohle – Nachbehandlung durch Abdecken mit Wärmedämmmatten

rohe Birke / Birke) aufgebracht. Dadurch sollte der Rauigkeitsbeiwert nach Strickler mindestens $k_{st} = 85 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erreichen.

Bei den Kammerwänden wurde eine 27 mm dicke Dreischichtenplatte (roh), vertikal aufgebracht auf Trägerelementen (Bild 22), und für die sichtbaren Flächen der Betriebsräume eine 21 mm dicke Betonsperrholzschalung, 15fach verleimt mit Filmauftrag (80 g - 160 g) auf Rahmenschalungen eingesetzt.

Zusätzlich zum Schalungskonzept wurde ein Anker- und Konenverschlusskonzept erarbeitet. Dieses ist insbesondere für Wasserbauwerke neben der Wasserundurchlässigkeit des Betons und der sachgerechten Ausführung der Arbeitsfugen von entscheidender Bedeutung. So wurde im Anker- und Konenkonzept die bauteil- und beanspruchungsbezogene Wahl der Anker und die daraus resultierende Wahl des Konenverschlusses gemeinsam erarbeitet.

Die Anforderungen an die Ausschallfrist von 7 Tagen wurden mit nur wenigen Ausnahmen (Einsatz schnell erhärtender Betone im Bereich des Schleusenbetriebsgebäudes und

beim Einsatz von Zweitbeton) konsequent eingehalten.

Die horizontalen und flachgeneigten sichtbar bleibenden Betonoberflächen, insbesondere die Sparbecken- und Schleusenkammersohlen, wurden zur Nachverdichtung nochmals mit einer Rüttelbohle abgezogen und mit Teller- oder Flügelglätter bearbeitet. Die begehbaren Flächen erhielten nach Abschluss der o.g. Arbeiten einen Besenstrich.

Der Beton wurde 21 Tage nachbehandelt, wobei die Schalzeit mit angerechnet wurde.

Bei besonders massigen Bauteilen wurden zur Nachbehandlung Dämmmatten aufgelegt (Bild 23). Hierzu zählen neben den Sohlbereichen auch die ersten drei Wandabschnitte, da der Fuß der Außenwände 7,80 m und der der Mittelmole 12,50 m Bauteildicke aufweisen.

Die Wände wurden ab dem 3. Betonierabschnitt mit Folien abgedeckt. Mit zunehmender Wandhöhe und damit ungünstigen Windverhältnissen führte die Nachbehandlung mit Folien zu erheblichen Problemen. Aus diesem Grund wurde in diesen

Bereichen ein flüssiges Nachbehandlungsmittel aufgesprüht.

10 Qualitätssicherung und Bauüberwachung

Zur Qualitätssicherung (QS) im Betonbau war im Vertrag ein QS-Plan vereinbart, der mit dem Auftraggeber abzustimmen war. Die 15 Seiten des QS-Plans wurden von beiden Vertragspartnern nicht als lästige Formalie verstanden, sondern als Arbeitsunterlage – aber auch als Argumentationshilfe – genutzt. Der QS-Plan wurde je nach Erfordernis überarbeitet und ergänzt.

Im Einzelnen enthielt der QS-Plan für die Stahlbetonarbeiten folgende Punkte:

1. Betonsortenverzeichnis mit Zusammenstellung der Eignungsprüfungsergebnisse
2. Vorgaben zum Herstellen, Liefern, Fördern und Einbauen des Frischbetons
3. Umfang und Durchführung der Güteprüfung
4. Ausstattung des Baustellenlabors und Qualifikation des Prüfpersonals
5. Betonnachbehandlung
6. Technische Vorgaben für Bewehrung, Bewehrungseinbau und Einbau von Stahlteilen
7. Ausführung von Arbeits- und Dehnfugen
8. Verfahrensweise beim Auftreten von Rissen

Außerdem wurde neben dem sonst üblichen Wochenbetonierplan für jeden der über 1.000 Bauabschnitte einzelne Betonierpläne aufgestellt. Diese wurden von der Bauüberwachung des Neubauamts mit oder ohne Änderungen freigegeben. Der Betonierplan enthielt alle wesentlichen, insbesondere die betontechnologischen Angaben zum jeweiligen Betonierabschnitt.

Die Bewehrungs- und Schalungsmaßnahmen aller Betonierabschnitte

erfolgten durch die Bauüberwachung des Wasserstraßen-Neubauamts. Dabei begann die Bauüberwachung nicht erst am Tag der Abnahme, sondern wurde baubegleitend und kontinuierlich durchgeführt. Bei sehr großen und komplizierten Betonierabschnitten mit bis zu 1.000 t Bewehrungsstahl ist dies auch praktisch gar nicht anders möglich.

Vor der eigentlichen Abnahme erstellte der Auftragnehmer ein Vermessungsprotokoll, das die Angaben zur Nachrichtung der Schalung, bezogen auf die Sollmaße, enthielt.

Neben der Lieferscheinkontrolle wurden auch die Frischbetoneigenschaften überwacht. So wurden parallel auch der Wassergehalt des Frischbetons durch Darren und der Luftgehalt regelmäßig geprüft.

Größtes Augenmerk wurde auf die Einhaltung der bereits erwähnten Schal- und Nachbehandlungszeiten gelegt. Diese wurden konsequent über die ganze Bauzeit „durchgehalten“. Bei den wenigen Ausnahmen einer Verkürzung der Ausschallfrist wurde die Betonqualität durch entsprechende verschärfte Maßnahmen der Nachbehandlung, wie das sofortige Einpacken des Bauteils in Dämmmatten oder Styropor sowie einer zerstörungsfreie Festigkeitsprüfung am Bauwerk, sichergestellt und dokumentiert.

Neben den bereits auf Großbaustellen üblichen zusätzlichen Kontrollprüfungen der Festbetonkennwerte wurden auch die Ausgangsstoffe und die Bewehrung durch die Bauüberwachung des Wasserstraßen-Neubauamts (WNA) geprüft. Folgende Prüfungen wurden auf Veranlassung des WNA vom IBMB TU Braunschweig durchgeführt:

- regelmäßige Messungen der Kernfeuchte der Gesteinskörnungen
- stichprobenartige Bestimmung organischer Bestandteile der Gesteinskörnungen
- stichprobenartige chemische Untersuchungen des Zements

- stichprobenartige chemische Untersuchungen der Flugasche
- stichprobenartige Prüfung der Zugfestigkeit der Bewehrung

Abschließend ist festzuhalten, dass eine funktionierende und vorausschauende Bauüberwachung und ein abgestimmtes Qualitätsmanagement des Auftragnehmers nicht nur eine hohe Qualität des Bauwerks sichern, sondern auch Bau- und Planungsfehler erkennen, Abläufe optimieren und somit auch Kosten und Bauzeit positiv beeinflussen können.

11 Literatur

- [1] H.-W. Partenscki, Binnenverkehrswasserbau Schleusenanlagen. Springer-Verlag 1986.
- [2] Hallauer, O.: Hochofenzement im Wasserbau. Beton-Informationen 40 (2000) H. 4, S. 47-51.
- [3] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215); Ausgabe 1998. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (Hrsg.).
- [4] Verfügung V-7/97-44: Vorläufige Verfahrensweise bei Ausschreibungen von Baumaßnahmen nach ZTV Beton Stb. 93 und ZTV-K, Ausgabe 1996 und Ergänzende Festlegungen zu Anforderung, Prüfungen und Güteüberwachung von Betonzuschlag nach DIN 4226 und Beton. Landesamt für Straßenbau Sachsen-Anhalt vom 30.07.97 und 31.01.97 (Hrsg.).
- [5] DBV-Merkblatt „Zugabewasser für Beton“, Fassung Januar 1982, redaktionell überarbeitet 1996. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (Hrsg.).
- [6] Setzer, M.J.; Auberg, R.: CIF-Test – Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 64 (1998) H. 4, S. 94-105.
- [7] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219); Ausgabe 1997. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (Hrsg.).
- [8] Westendarp, A.: Entwicklung und Tendenzen bei Baustoffen und Bauausführung im Schleusenbau. Beton-Informationen 41 (2001) H. 1, S. 3-8.

Bauschild

Bauherr

- Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg

Ausführung

- Arge Schleuse Hohenwarthe:
 - E. Heitkamp GmbH
Niederlassung Ingenieurbau, Glinde
 - Bauer Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen
- mg ingenieering, Brückenbau Plauen GmbH
Geschäftsbereich Stahlwasserbau, Neu-Isenburg

Planung, Ausschreibung und Entwurf

- Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg
- Dorsch Consult Ing. Ges. mbH, München & Rhein Ruhr Ing. Ges. mbH, Dortmund
- RMD Consult GmbH, Unterföhring

Tragwerksplanung

- Heitkamp Consult, Herne
- Bauer Spezialtiefbau, Schrobenhausen

Planprüfung und Prüfindgenieure

- Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg
- Prof. Dr. Ing. Dr. e.h. Gerd König, Leipzig
- Dipl.-Ing. Ulrike Schömig, Keinstheim

Betonentwurf & Eignungsprüfung

- Heitkamp SCB GmbH
- Universität Bochum/ Universität Hannover: Univ.-Prof. Dr. Ing. Ludger Lohaus

Schalungslieferant

- Heitkamp Systembau, Herne
- PERI GmbH, Magdeburg

Transportbetonlieferungsgemeinschaft

- ELSKES Beton
- Neustädter Transportbetonwerk
- Weber Beton Magdeburg

Betonfertigteile

- EDU Element-Decken GmbH & Co. KG, Werke Magdeburg und Gommern
- Beton-Fertigteilwerk Luschendorf GmbH & Co. KG

Betonausgangsstoffe

- Schwenk Zement GmbH & Co. KG, Bernburg
- STEAG Entsorgungs GmbH, Dinslaken, Block Herne
- Kies- und Baustoffwerke Barleben, Werk Rothensee
- Mitteldeutsche Baustoff GmbH, Sennewitz, Werk Difturt
- MELIUS Baustofftechnik GmbH, Wesel (Zusatzmittel)

Betonförderung

- Müller Betonförderservice, Dessau

Fremdüberwachung

- Güteschutz Wiesbaden und Berlin

Bauüberwachung

- Wasserstraßen-Neubauamt Magdeburg

Laborprüfungen für den Bauherren

- IBMB TU Braunschweig

Beratung des Bauherren und besondere Prüfungen

- BAW Karlsruhe