



Doppelsparschleuse Hohenwarthe

*Martin Natho, Hubert Stratmann, Bernd Talbierski, Ralf Vorreyer, André Weisner
WNA Magdeburg*

1 Bauweise

Die Doppelsparschleuse Hohenwarthe bildet das östliche Ende der Mittellandkanalhaltung Sülfeld-Hohenwarthe. Anstelle des einst geplanten und teilweise fertiggestellten Hebewerkes in Hohenwarthe wird durch den Neubau der Schleuse der direkte Auf- und Abstieg zwischen Mittellandkanal und Elbe-Havel-Kanal ermöglicht. Die Planung der Schleuse war von dem Grundsatz geprägt, eine bereits bewährte Schleusenkonstruktion zu wählen, die dem Stand



der Technik entspricht und einen dauerhaften, sicheren und langlebigen Betrieb gewährleistet. Pate stand die im Jahr 1991 am Rhein-Main-Donau-Kanal in Betrieb genommene Schleuse Berching. So sollte die Schleuse in massiver Bauweise geplant und das System mit drei Sparbecken beibehalten werden. Die Füll- und Entleerungszeiten von 18 min. und die Dauer einer Kreuzungsschleusung von 1 Std. sollten nicht überschritten werden. Des Weiteren sollte das hydraulische System, insbesondere das Konzept des Grundlaufsystems nicht verändert werden.

Abb. 1 Gesamtanlage im Mai 2003 Foto: Luftbild & Pressefoto(R)

2 Beschreibung der Schleusenanlage

Die Schleusenanlage besteht aus 2 parallel angeordneten Schleusenkammern, die durch eine 12,50 m breite Mittelmole miteinander verbunden sind. Die Breite der Schleusenkammern beträgt 12,50 m, bei einer nutzbaren Länge von 190 m. Damit können Schiffseinheiten bis 185 m Länge, 11,45 m Breite und 2,80 m Abladetiefe die Schleuse passieren. Dies entspricht der Binnenwasserstraßenklasse Vb. Die zu überwindende Höhendifferenz beträgt bei Normalwasserstand 18,55 m.

Im Oberhaupt der Schleuse befinden sich zwei ölhdraulisch angetriebene Zugsegmenttore mit Torsionsrohr. Die Abmessungen betragen 12.500 mm in der lichten Weite und 5.400 mm in der Höhe. Ein Tor hat ein Gesamtgewicht von ca. 40 t. Die Betriebsräume für den hydraulischen Torantrieb und die hydraulische Steuerung sind in der Mittelmole angeordnet.

Als Untertore werden überstaute Hubtore eingesetzt. Diese verschließen die Schleusenkammer zwischen Drempeel und Tormaske und sind als Falwerkstor ausgebildet. Die Abmessungen eines Tores betragen 12.500 mm als lichte Weite und 11.000 mm als Höhe. Das Heben und Senken der Tore erfolgt erstmalig direkt mit in Planiehöhe beidseitig der Tore aufgestellten rund 12 m langen Hydraulikzylindern ohne Gegengewichtsausgleich. Auch hier befindet sich der Betriebsraum für den hydraulischen Torantrieb und die hydraulische Steu-



erung in der Mittelmole. Der kammerseitige Anfahrtschutz wird durch Stoßschutzschwingen mit Dämpfungselementen erreicht.

Neben zahlreichen Nischen- und Kantenpollern gehören auch 16 Schwimmpoller zur Ausrüstung der Schleusenammern. Die Schwimmpoller werden in 1,50 m tiefen Nischen in der Mittelmole der Schleusenammern geführt.

Das Füllen und Entleeren der Schleusenammern erfolgt mit einem kombinierten Grundlauf-/Längskanalsystem. In den Kammerwänden befinden sich auf Höhe der Schleusensole die Längskanäle. Die 1,80 m hohen Grundlaufsysteme sind in die Kammersole integriert. Die in der Mittelmole liegenden rechteckförmigen Längskanäle sind mit dem jeweils oberwasserseitigen Grundlaufsystem und den Sparbeckenzuläufen verbunden, die landseitig liegenden trapezförmig ausgebildeten Längskanäle mit dem jeweils unterwasserseitigen Grundlaufsystem und den Sparbeckenzuläufen. Die unter der Kammersole angeordneten Grundlaufsysteme verzweigen sich vom Zulauf aus dem jeweiligen Längskanal bzw. Sparbecken symmetrisch über je eine Wasserkammer in vier Füllbatterien mit je 44 Eintrittsöffnungen in die Schleusenammern entlang der Kammerwände. Eine Verbindung zwischen den Grundlaufsystemen der nördlichen und südlichen Kammer besteht nicht. Als Verschlussorgan der Längskanäle werden acht Rollschütze, die als Trägerrost mit ebener Stauwand ausgebildet sind und eine lichte Weite von 2.000 mm sowie eine lichte Höhe von 3.250 mm aufweisen, eingesetzt. Der Antrieb der Rollschütze erfolgt über einen mittig angeordneten Hydraulikzylinder.

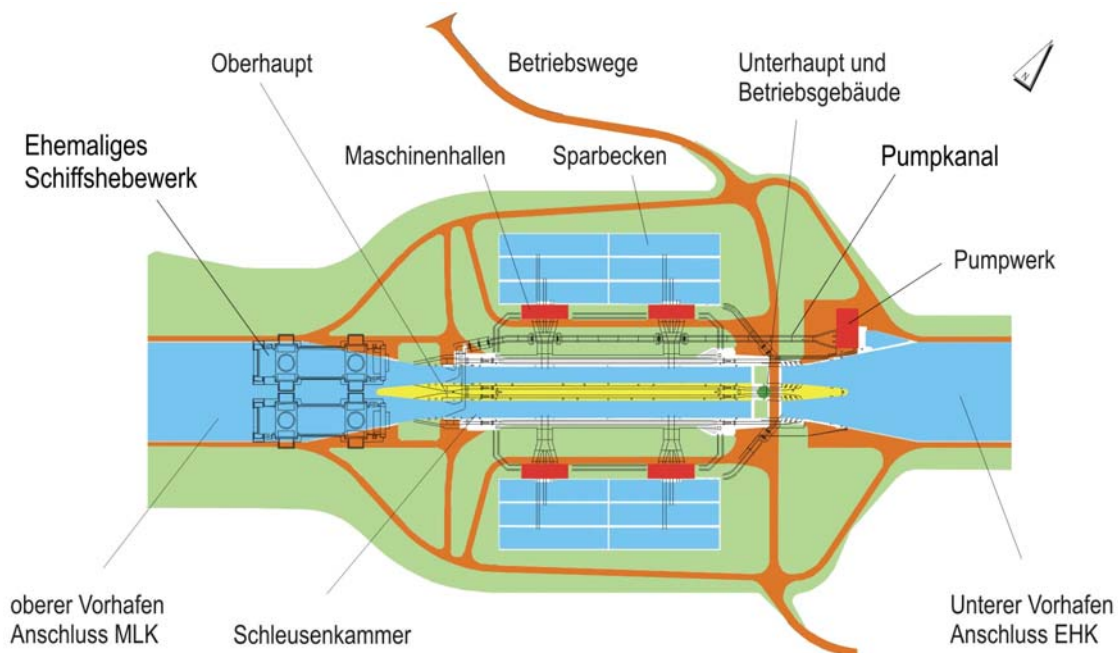


Abb. 2 Lageplan der Schleusenanlage

Jeder Schleusenammern sind 3 Sparbeckenreihen zugeordnet. Diese sind seitlich der Kammer treppenförmig nebeneinander positioniert und besitzen jeweils eine Länge von 167 m und eine Breite von 15,50 m. In der Mitte sind die Sparbeckenreihen durch eine Tauchwand unterteilt. Die Tauchwände dienen der hydraulischen Ausgewogenheit beim Zu- bzw. Abfließen von Wasser. Die Sparbeckenzuläufe stellen die Verbindung von Sparbecken und Schleusenammern her. Die jeweils 3 Einzelzuläufe werden im Bereich der Maschinenhalle zusammengeführt und von hier an den jeweiligen Längskanal angeschlossen. Die Maschinenhallen beherbergen die insgesamt zwölf Verschlussorgane zur Regulierung des Zuflusses von der Kammer in die Sparbecken und umgekehrt. Auch hier kommen ölhydraulisch angetriebene Rollschütze zum Einsatz. Die Abmessungen der Rollschütze betragen jeweils 2.000 mm als lichte Weite und 3.250 mm als lichte Höhe.

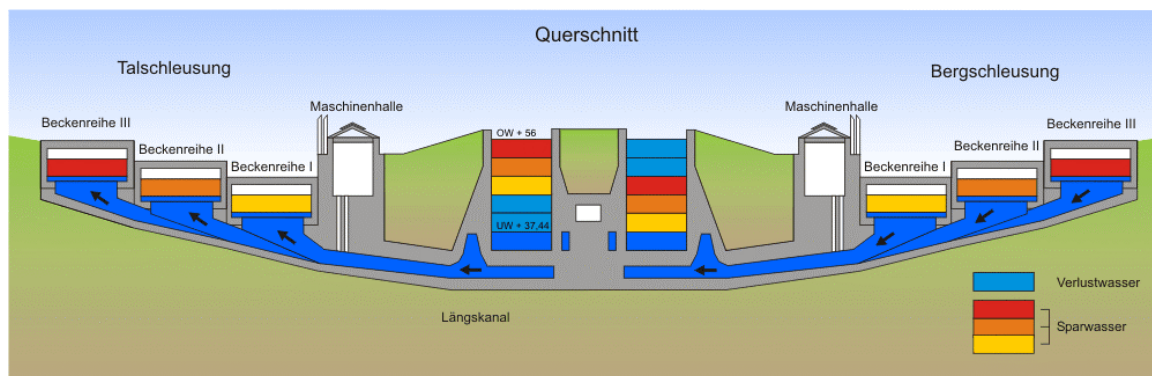


Abb. 3 Darstellung der Sparbeckenfunktion

Durch die Sparbecken wird eine Wassereinsparung von ca. 60 % erzielt. Die Restwassermenge von rd. 19.600 m³ wird in die untere Haltung abgeleitet und muss durch Rückpumpen wieder ersetzt werden. Für das Rückpumpen steht ein Pumpwerk mit 3 halbaxialen Schraubenradpumpen zur Verfügung. Jede Pumpe verfügt über eine Nennfördermenge von 3,5 m³/s bei einer geodätischen Förderhöhe von ca. 19 m. Das Pumpwerk befindet sich nord-östlich der Schleuse. Der dreieckförmige Einlaufbereich ist durch eine Tauchwand vom Einfahrtsbereich getrennt. Die Tauchwand fungiert als Leitwerk für die Schifffahrt und als Grobrechen. Im direkten Einlaufbereich der Pumpen befindet sich ein Feinrechen. Hinter den Pumpen vereinen sich die Einzelstränge in der Pumpenkammer. Es folgt der parallel zu den Kammern auf der Nordseite liegende Pumpkanal, der sich im Oberhaupt in einen nördlichen und in einen südlichen Auslauf verzweigt und im Einfahrtsbereich endet.

Die Schleusenrevisionsverschlüsse können je nach Erfordernis wahlweise im Oberwasser am Beginn des Einfahrtsbereichs oder unmittelbar vor dem Obertor und im Unterwasser zwischen den Ausläufen der Längskanäle und dem unteren Vorhafen gesetzt werden. Der jeweilige Verschluss besteht aus Stützböcken mit senkrechten Pfosten aus Doppel-T-Profilen und unter einem Winkel von 40° angekoppelten Streben. Die darauf aufgesetzten Laufstege fixieren die Stützböcke quer zur Schleusenlängsachse. Zwischen den Pfosten werden jeweils vier 1.300 mm hohe Dammtafeln mittels Zangenbalken übereinander gesetzt.

Um den Betrieb der Schleusenanlage auch im Reparatur- bzw. Revisionsfall eines Rollschützes aufrecht halten zu können, besteht die Möglichkeit in Richtung Oberwasser und Unterwasser bzw. in Richtung der Sparbecken und der Kammer einen Revisionsverschluss zu setzen und damit einen eng begrenzten Raum trockenulegen. Als Revisionsverschlüsse kommen Gleitschütze zum Einsatz. Diese sind für die Längskanal- und Sparbeckenverschlüsse identisch konstruiert.

Die Pumpen können durch Einbau von Revisionstafeln im Saugkanal und durch Schließen der Revisionsschieber einzeln trocken gelegt werden. Durch Schließen aller Revisionsschieber und Setzen der Revisionsverschlüsse im Oberhaupt kann der Pumpkanal trocken gelegt werden.

Zur Erleichterung der Arbeiten im Revisions- bzw. Reparaturfall sind die Maschinenhallen und das Pumpwerk mit Brückenkränen ausgestattet. Für die Wartung bzw. Reparatur der Hydraulik stehen in den Torantriebsräumen im Oberhaupt und im Unterhaupt sowie in den Längskanalverschlussräumen handbetriebene Krane zur Verfügung.

Der obere Vorhafen stellt das Bindeglied zwischen der Schleuse Hohenwarthe und dem ebenfalls neu errichteten, hier in Dammlage verlaufenden, Mittellandkanal dar. Der Kanalwasserstand liegt rund 15 m über dem Gelände. Die Uferwände sind als im Damm rückverankerte Stahlspundwand hergestellt. Die Liegeplätze und sonstigen Uferbereiche sind entsprechend DIN 19703 mit Steigleitern, Nischen- und Kantenpollern, Kantenschutz und Be-



leuchtung ausgerüstet. Der obere Vorhafen ist östlich von MLK-km 324 + 45 mit einer 0,40 m dicken Tondichtung versehen. Diese ist im Bereich des Spundwandanschlusses über eine Breite von 5 m auf eine Dicke von 1,50 m nach unten verzogen und an die Spundwand angedrückt. Im Bereich der Hebewerksgründung ist die Sohldichtung auf 0,60 m verstärkt. Der Vorhafen und der Einfahrtbereich ist bis zur Schleuse mit Wasserbausteinen der Klasse III in einer Schichtdicke von 0,60 m, die entlang der Uferwände in einer Breite von 12 m verklammert sind, gesichert. Zwischen Oberkante der Sohldichtung und den Wasserbausteinen ist ein 0,40 m dicker Kornfilter sowie ein geotextiles Vlies als Trennschicht eingebaut. Für den unteren Vorhafen ist auf dem südlichen Ufer ein 420 m langer Liegeplatz und auf dem nördlichen Ufer ein 320 m langer Liegeplatz jeweils in Spundwandbauweise mit Rückverankerung angelegt. Die Sohle besitzt hier keine Dichtung. Der Kolkenschutz besteht aus einer Abdeckung mit geotextilem Vlies und einer darauf aufgetragenen 60 cm dicken Schicht aus Wasserbausteinen der Klasse III, die auf einer Breite von 12 m entlang der Uferwände teilvergossen sind.

Am Unterhaupt der Schleuse, zwischen den beiden Kammern gelegen, befindet sich das rund 30 m hohe Schleusenbetriebsgebäude (gemessen vom unteren Vorhafen) mit dem Steuerstand. Vom Steuerstand aus wird die gesamte Schleusenanlage dank Einsatz modernster Leit- und Überwachungstechnik von einer Person bedient.

3 Bauvertrag

Die Arbeiten in Hohenwarthe begannen im Jahr 1996 mit der Rodung des gesamten rund 40 Hektar großen Baufeldes. Ein Jahr später konnte dann mit dem Abbruch der Dammschlussmauer des alten Hebewerkes begonnen werden. Gleichzeitig erfolgte die Verfüllung der ebenfalls bis 1942 fertiggestellten Schwimmerschächte und Trogkammern des Hebewerkes.

Im März 1998 wurde eine EU-weite Ausschreibung veröffentlicht. Die Verdingungsunterlagen wurden im Auftrag des WNA Magdeburg von der Dorsch Consult Ing.-Gesellschaft mbH und der RRI Ing.-Gesellschaft mbH erarbeitet. Nach Prüfung von insgesamt 14 Angeboten mit 209 Nebenangeboten und 25 Varianten ging der Auftrag im September 1998 an die Arge Schleuse Hohenwarthe, bestehend aus den Firmen E. Heitkamp GmbH, Bauer Spezialtiefbau GmbH und Stahlbau Plauen GmbH. Das Auftragsvolumen betrug rund 220 Mio. DM. Die wesentlichen Baumassen waren rund 45.000 m² Dichtwandfläche, 2.000.000 m³ Erdarbeiten, 22.000 lfd.m Großbohrpfähle Ø 88 cm, 34.000 t Bewehrung, 180.000 m² Schalung, 320.000 m³ Beton, 1,8 km Spundwand sowie 2.000 t Stahlwasserbaukonstruktionen.

Die Ausführungsplanung war Bestandteil der vertraglichen Leistung und wurde von Heitkamp Consult koordiniert. Für die Prüfung der Ausführungsplanung in statischer Hinsicht wurden die Prüfungenieure Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. König, Massivbau, und Frau Dipl.-Ing. Ulrike Schömig, Stahlwasserbau, als Prüfgemeinschaft beauftragt.

4 Grundbau

4.1 Dichtwand und Baugrube

Da bereits in der Planfeststellung eine großflächige Grundwasserabsenkung für die Erstellung der Baugrube ausgeschlossen wurde, wurde zu Beginn der Arbeiten das gesamte Baufeld des Schleusenbauwerks und der Sparbecken mit einer 60 cm dicken, ca. 1.200 m langen und ca. 20 m bis 50 m tiefen Dichtwand umschlossen.

Folgende Vorgaben wurden zur Erstellung der Dichtwand gemacht:

- Durchlässigkeit $k_f \leq 1 \times 10^{-10}$ m/s (Laborwerte nach 56 Tagen)



- Druckfestigkeit $q_u \geq 0,5 \text{ MN/ m}^2$ (28 Tage)
- Bruchstauchung $\varepsilon \geq 0,5 \%$
- Einbindetiefe 5 m bis 8 m in die undurchlässige Schicht
- Qualitätssicherungsplan



Abb. 4 Dichtwandfräse

Zur Ausführung kam eine Ein-Phasen-Schlitz-Dichtwand, die mittels Schlitzwandfräse- und Greifer hergestellt wurde. Des Weiteren wurde für diese Arbeiten eine Misch-, und Separierungsanlage mit Versorgungsleitungen aufgebaut. Der eingesetzte Schlitzwandgreifer diente einerseits zur Herstellung der Dichtwand, wurde aber auch in größerem Umfang für die Beseitigung von Hindernissen in Form von Steinen eingesetzt.

Die Rezeptur der Stütz-, und Dichtsuspension wurde wie folgt festgelegt:

- 910 Liter Wasser
- 230 kg Dorotec DW – Binder Typ 90
- 40 kg Bentonit Tixoton TP
- 1,125 kg HW- Stabilisierer.

Zur Kontrollprüfung wurden durch das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig im Auftrag des WNA Magdeburg insgesamt 88 Proben gezogen, wobei der Durchlässigkeitsbeiwert für alle Proben nach 56 Tagen bei $k_f < 1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ lag. Die geringste festgestellte einaxiale Druckfestigkeit betrug nach 28 Tagen Erhärtung $0,71 \text{ N/mm}^2$ und die maximale $2,65 \text{ N/mm}^2$. Die Bruchstauchung nach 28 Tagen differiert zwischen $0,6 \%$ und $2,7 \%$.

Bereits vor dem Schließen der Dichtwand begannen die Erdarbeiten zum Aushub der geböschten Baugrube. Die Baugrubensicherung der unteren $5,50 \text{ m}$ und der Sparbeckenzuläufe erfolgte durch eine rückverankerte Trägerbohlwand. Diese diente gleichzeitig als verlorene Schalung für die zu betonierenden Bauteile. Die Erdmassen wurden im Bereich des oberen Vorhafens eingebaut. Die Auffüllungen im Bereich des oberen Vorhafens / des alten Schiffshebewerkes stellten eine Vorbelastung des vorhandenen Baugrunds dar, die einen Teil der zu erwartenden Setzungen vorweg nehmen sollte.

Über jeweils 7 Brunnen auf der Nord- und Südseite der Baugrube erfolgte das Lenzen.

4.2 Gründung

Limitierende Faktoren für die Wahl des Standortes der Doppelsparschleuse Hohenwarthe sind die westlich der Schleuse gelegene Abbruchkante der Haldenslebener Scholle, eine geologische Störzone, sowie das 70 m tief gegründete Doppelhebewerk und die östlich der Schleuse gelegene Schleuse Niegripp, mit dem Niegripper Verbindungskanal und Wendebcken.

Die Baugrunderkundungen zeigten sehr ungleichmäßige Bodenschichtungen. Der Baugrund besteht aus Fluss- und Schmelzwassersanden mit unterlagernden Kiesen und Geröll sowie aus teilweise sehr mächtigen und zudem unregelmäßig auskeilenden Bänderton-, Bänderschluft-, Geschiebemergel- und Septarientonschichten. Daher musste mit extrem hohen Setzungen und Differenzsetzungen gerechnet werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die sich unmittelbar unterhalb der Gründungssohle mit einer Mächtigkeit von bis zu 10 m erstreckende Bändertonschicht keine ausreichende geohydraulische Stabilität besitzt. Aufgrund von Schwellbelastungen, wie sie durch das Füllen und Entleeren der Schleusenkommer regelmäßig entstehen, bestand die Gefahr einer Kontakterosion im Untergrund. Nach einge-



hender fachlicher Diskussion wurde sich schließlich für eine auf der sicheren Seite liegende reine Pfahlgründung mit fugenloser Sohlplatte entschieden. Dieses Vorgehen führte unter Berücksichtigung der Gründungsnebenangebote zur Beauftragung einer Pfahlgründung für die Maschinenhallen und das Pumpwerk sowie zu flachgegründeten monolithischen Sparbecken. Die Verbindungskanäle zwischen Kammer und Sparbecken sowie der Pumpkanal zwischen Pumpwerk und Oberhaupt sind als Gelenkkette flach gegründet. Durch eine Verlegung des Drehpunktes von der Unterseite in die Mitte der Kanalwände konnte die Fugenbewegung an den Fugenbändern auf ein Sechstel reduziert werden.

Eine Optimierung der Pfahlgründung und damit eine Reduzierung der Gesamtlänge der Bohrpfähle konnte aufgrund einer vorab im Jahr 1998 durchgeführten Probelastung und weiterer vergleichbarer Probelastungen erfolgen.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die ausgeschriebenen Bohrmeter den tatsächlichen gegenübergestellt.

Bauteil	Ø mm	Ausschreibung	Ist- Herstellung
Schleuse	880	55.654,00 m	21.505,11 m
Auslauflamelle	400	2.237,00 m	285,00 m
Pumpwerk	880	533,00 m	346,50 m
Sparbecken	880	1.301,00 m	0,00 m
Maschinenhalle	880	1.880,00 m	1.337,07 m
gesamt		74.314,00 m	23.473,68 m

Tab. 1 Bohrmeter

Die Herstellung der Bohrpfähle erfolgte im Kelly-, und Doppelkopfverfahren. Auf das Kelly-Bohrverfahren wird hier nicht näher eingegangen.



Abb. 5 Bohrgerät Bauer BG 42

Beim Doppelkopfverfahren handelt es sich um ein verrohrtes Schneckenbohrverfahren mit durchgehender Bohrschnecke und Bohrrohr in Länge des herzustellenden Bohrpfahles. Die Bohrschnecke und die Verrohrung werden durch gegenläufiges Drehen mit gleicher Drehgeschwindigkeit vom Bohranfang bis auf Endtiefe abgeteuf. Die Verrohrung läuft dabei immer mit ca. 0,50 m der Bohrschnecke voraus. Das Seelenrohr der Bohrschnecke ist hohl und beim Abteufen der Bohrung am Bohrschneckenkopf geschlossen. Nach Erreichen der Endtiefe wird die Seelenrohröffnung in der Bohrschnecke durch Gegenlauf geöffnet und die Verrohrung mit Bohrschnecke kontinuierlich gezogen. Dabei wird gleichzeitig der Pfahlbeton über das Seelenrohr der Bohrschnecke mit einem Überdruck an der Austrittsstelle in die Bohrung gepumpt. Während der Betonage wird mittels eines Druckgebers an der Bohrschnecke der Betondruck überwacht und aufgezeichnet. Über das Bohrprotokoll werden der Beton-

druck, das Bohrprofil, die Ziehgeschwindigkeit / Umdrehungsrate jedes Pfahles nachgewiesen. Nach abgeschlossener Betonage wird der Bewehrungskorb mit konischer Verjüngung im Pfahlfußbereich in das mit Beton gefüllte Bohrloch eingebracht. Dies geschieht unter Zuhilfenahme eines so genannten Sternträgers mit Aufsatzrüttler, der die Rüttelbewegung in den Fußpunkt des Bewehrungskorbes einbringt. Ohne Zuhilfenahme des Aufsatzrüttlers versinkt der Bewehrungskorb bereits zu ca. 2/3 durch Eigengewicht. Über den



Abb. 6 Bohrpfahlarbeiten



Aufsatzrüttler werden die noch erforderlichen ca. 1/3 der Bewehrung eingebracht. Von den insgesamt 1.248 Bohrpfählen unter der Schleuse wurden 53 % im Doppelkopfverfahren hergestellt. Die bis zu 23 m langen Pfähle konnten mit diesem Verfahren teilweise innerhalb von 20 Minuten abgebohrt werden.

An ca. 10 % der hergestellten Pfähle erfolgten Integritätsprüfungen nach dem Low-Strain-Verfahren; hierbei wurden keine Qualitätsminderungen oder Risse festgestellt.

5 Massivbau

5.1 Konstruktion

Die Doppelsparschleuse Hohenwarthe erfährt durch ihr großes Eigengewicht, durch die hohen und flächigen Anschüttungen und durch die Wasserlast eine enorme statische Beanspruchung. Die statische Belastung der Gründungsfläche liegt insgesamt bei etwa 2,3 Mio t. Darüber hinaus verursacht der Schleusungsvorgang in den Kammern und in den Sparbecken dynamische Beanspruchungen. Bei einer Schleusung werden rund 47,8 Mio Liter Wasser je Kammer bewegt. Der Durchfluss erreicht in den Sparbeckenzuläufen 120 m³/s und in den Längskanälen 70 m³/s. Der Vorgang erfolgt bis zu 16 mal täglich!



Abb. 7 Schleusenkamerwände

Die Ausführung der 250 m langen, 55 m breiten und 5,50 m dicken Sohle als monolithische Platte führt zu großen Zwangsbeanspruchungen aus abfließender Hydrationswärme und Verformungen aus den Lasteinwirkungen. Für den gesamten Bauablauf wurde eine instationäre Wärmeberechnung durchgeführt und die zu Rissen führende Betonzugspannung durch Bewehrung abgedeckt. Die aufgehenden Wände der Schleusen-kammer wurden durch Dehnungsfugen in 14 Blöcke geteilt.

5.2 Beton

Für das Bauwerk wurde ein Beton mit besonderen Eigenschaften gefordert. Das Anforderungsprofil wurde im Wesentlichen durch die Bundesanstalt für Wasserbau konzipiert. Für die Herstellung dieses Betons gelten die Bedingungen für Beton B II, und zwar unabhängig von der geforderten Festigkeitsklasse. Alle Betone B 25 und höherwertig müssen als wu-Beton gemäß DIN 1045 mit erhöhten Anforderungen ($w_u \leq 30$ mm) zusammengesetzt sein. Die Betonzusammensetzungen waren vor Beginn der Betonarbeiten abzustimmen und in Eignungsprüfungen die geforderten Eigenschaften nachzuweisen.

Die Betonsorten waren nach den geforderten Eigenschaften wie:

- Druckfestigkeit
- hoher Frostwiderstand
- hoher Frost- und Tausalz widerstand
- hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff (grundwasserbedingt)
- Verarbeitbarkeit, Konsistenz unter Berücksichtigung der zu erwartenden Temperatur und der Bearbeitungszeit

einzuteilen, wobei die Zusammenlegung mehrerer geforderten Eigenschaften in eine Beton-sorte 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.

Insbesondere die Massenbetone waren so zu planen und auszuführen, dass alle Anforderungen an die Betoneigenschaften erreicht werden. Diese Problemstellung setzt eine Gratwanderung bei der Aufstellung der Betonzusammensetzungen voraus.

Die technischen Randbedingungen, die für den Zement vorgegeben wurden, zielen in erster Linie auf die Begrenzung der Wärmeentwicklung bei Massenbeton ab. Für alle massigen Bauteile sollten Hochofenzemente (CEM III/A 32,5 - NW/HS oder 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 hüttensandreicher CEM III/A 32,5-NW/NA. Mit 240 kg/m³ für den Sohlbeton und 270 kg/m³ für den Kammerwandbeton wurde ein Zementgehalt an der unteren Grenze der Normvorgabe gewählt. Die verschärften Anforderungen zur Begrenzung der Hydratationswärmeentwicklung 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 den sehr günstigen Verlauf und die Größenordnung der Hydratationswärme.

Portlandzement wurde nur für die Hochbauteile des Schleusenbetriebsgebäudes und der Maschinenhallen, beim Brückenüberbau, bei den Sparbeckenwänden und bei der Schleusenplanie, für die ein hoher Frost- und Tausalz widerstand gefordert war, eingesetzt. Ferner wurde für die Zweitbetonbereiche ein CEM II/B-S verwendet. Dieser besitzt 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.

Für den Verklammerungsbeton zur Schüttsteinsicherung in den Vorhäfen und Einfahrtsbereichen wurde CEM II A-L L und CEM I 32,5 eingesetzt.

Alle Zemente wurden aus einem Zementwerk geliefert.

Erste Untersuchungen und Risskartierungen der Bundesanstalt für Wasserbau zu den Kammerwänden und Sparbeckenwänden zeigten nur vereinzelt Risse. Diese lagen mit Rissbreiten von kleiner 0,25 mm im unkritischen Bereich.

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 führt.

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 und Verzögerer 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 Einsatz von Verzögerer. Bei der Betonage der 14 Sohlabschnitte waren Mengen zwischen 1.500 m³ und 6.900 m³ in 5 bis 6 Lagen bei Abschnittshöhen von 2,50 und 3,00 m einzubauen. Um ein Vernadeln mit der darunterliegenden Schicht sicherzustellen, war die Verlängerung der Verarbeitungszeit erforderlich.

Bei den Betonagen der relativ schlanken Sparbeckenwände mit einer Dicke kleiner 1,00 m und der Planie wurde eine Zusammensetzung für Beton mit hohem Frost- bzw. Frost- und Tausalz widerstand auf Basis eines CEM I 32,5 R unter Zugabe von Luftporen eingesetzt. Die Luftporen mussten in Abhängigkeit vom Mehlkorngelalt 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.

Das Bauwerk muss in durchfeuchtetem Zustand häufigen Frost-Tauwechseln sicher widerstehen. Für Beton mit hohem Frost- bzw. hohem Frost- und Tausalz widerstand war Zuschlag zu verwenden, bei dem bei der Prüfung nach DIN 4226 Teil 3, Abschnitt 3.5.3, der Durchgang durch das Prüfsieb 1 M.-% nicht überschreitet. Ferner durften nur Zuschläge verwendet werden, die hinsichtlich der Alkalireaktion als unbedenklich (EI) einzustufen waren. Durch ein petrographisches Gutachten war nachzuweisen, dass Einlagerungen von leichten Zuschlägen (poröser Kalkstein, Kreide, stark kreidige Flinte) und andere schädliche Bestandteile in der Lagerstätte, unter Auswertung der Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem bisherigen Betreiben der Lagerstätte, ausgeschlossen waren. Ergänzend zur Prüfung und Güteüberwachung nach DIN 4226 galt die Verfügung V-2/97-44 des Landesamtes für Straßenbau Sachsen-Anhalt. Die Sieblinie muss stetig sein und zwischen den Sieblinien A 32 und B 32 verlaufen. Die Wahl der Lagerstätte zur Gewinnung der Zuschläge war zustimmungspflichtig.

Verwendet wurden Rundkornzuschläge aus dem Raum Magdeburg (0/2 mm, 2/8 mm) und 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.

Die Herkunft und Eignung des Anmachwassers 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. Hierbei ergaben sich auch bei Wiederholungsuntersuchungen keine Besonderheiten.

5.3 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, während bei den Pfahl-, Zweit-, Verguss- und kolloidalen Verklammerungsbetonen andere Konsistenzbereiche und -toleranzen galten. Gemäß QS-Handbuch wurde neben der augenscheinlichen Kontrolle mindestens bei jedem fünften Fahrzeug die Konsistenz geprüft (rd. 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 Zuschläge erforderlich. In den Sommermonaten wurden die Großbetonagen dagegen in den Abend- und Nachtzeitraum gelegt, um Temperaturproblemen vorzubeugen.

Der LP-Beton für die Sparbeckenwände 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.-%. Um den Mindestwert von 4 Vol.-% an der Einbaustelle sicherzustellen, wurde daher als Annahmekriterium bei der Entnahme des Betons aus dem Mischerfahrzeug 5 Vol.-% festgelegt. Der Höchstwert an der Einbaustelle war begrenzt auf 6 Vol.-%, um die geforderte Festigkeit sicher zu erreichen.

5.4 Frostwiderstand

Maßgebend für den hohen Frostwiderstand ist eine geeignete Betonzusammensetzung. Durch die Wahl einer Zusammensetzung entsprechend ZTV-W 215 mit einem $(w/z)_{eq} < 0,50$ konnte auf die Zugabe von Luftporenbildner verzichtet werden.

Die Prüfung wurde in Anlehnung an die Verfahrensbeschreibung des CIF-Tests Setzer, Augsburg aus der "Betonwerke + Fertigteil – Technik" 64-98 durchgeführt, wobei die Lagerung der Prüfkörper der Nachbehandlungszeit der Bauteile angepasst wurde. Mittlerweile gibt es hierzu modifizierte Verfahrensbeschreibungen.

Als Prüfkriterium für das CIF-Verfahren wurde in der Baubeschreibung die mittlere Abwitterung nach 56 Zyklen mit $\leq 2.000 \text{ g/m}^2$ und der Abfall des dynamischen E-Moduls mit $\leq 30 \%$ festgelegt. Damit wurden die Bedingungen gegenüber der ZTV-W LB 219 ($\leq 40 \%$) verschärft.

Bei der Beanspruchung von Betonbauteilen im Süßwasser durch Frost sind erfahrungsgemäß Rissbilder und Gefügeveränderungen im Inneren des Betons infolge Frosteinwirkung das maßgebliche Kriterium. Im Bereich der frostbeanspruchten Schleusenammerwände wurde ein Beton ohne Luftporen mit 270 kg CEM III/A 32,5-NW/NA und 80 kg Flugasche je m^3 Beton eingebaut. Die Anforderung an den hohen Frostwiderstand wurde durch den äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ unter Anrechnung der Flugasche mit $\leq 0,5$ im Bauvertrag vorgegeben. Im Zuge der Eignungsprüfungen vor Baubeginn wurde der Grenzwert verschärft auf $\leq 0,47$ und eine maximale Gesamtwassermenge von 140 Liter/ m^3 Frischbeton festgelegt.

Hinsichtlich der Abwitterung und der Abnahme des dynamischen E-Moduls wurden die vertraglichen Anforderungen im Rahmen der Eignungs- und Güteprüfungen erfüllt. Zusätzlich veranlasste CIF-Prüfungen unter Beteiligung mehrerer Institute zeigten allerdings streuende Ergebnisse.

Eine verschärfte Güteprüfung wurde in der Form vereinbart, dass bei jedem 10. Fahrzeug vor dem Einbau eine Darrprüfung nach DIN 1048 Teil 1 durchgeführt wurde. Die über 650 Darrproben für den Kammerwandbeton mit hohem Frostwiderstand konnten die Einhaltung der Grenzwerte sicherstellen. Dabei wurde unabhängig hiervon die Kernfeuchte der Zuschläge nicht nur im Rahmen der Eignungsprüfung nachgewiesen, sondern auch in der Produktion stichpunktartig geprüft. Hierbei wurde der kleinste Wert der Kernfeuchteprüfungen als Abzugsmenge bei der Darrprobe vorgegeben, um so ein weiteres "Polster" für das sichere Einhalten des äquivalenten Wasserzementwertes $(w/z)_{eq}$ auf der Baustelle zu schaffen.

5.5 Betoneinbau

Der Einbau des Betons erfolgt im Wesentlichen durch Autobetonpumpen mit 52 m Mastlänge. Dabei waren bei den großen 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 Mittelsole durch die 52 m-Autopumpe auch mittels 10 m Traverse nicht mehr sichergestellt. Deshalb wurden je Kammer eine



Abb. 8 Großbetonage Oberhaupt



stationäre Pumpe am Unterhaupt installiert, die über 230 m Länge mit einem schienengeführten Kranverteilungsmast verbunden wurde. Mit Kran und Kübel wurde der Beton nur bei kleinen Bauteilen eingebaut.

5.6 Schalung und Nachbehandlung

Bei der Qualität der Betonoberflächen wird zwischen Sichtbetonflächen und Flächen, die mit fließendem Wasser in Kontakt kommen, unterschieden. Für die unterschiedlichen Anforderungen wurde vor Beginn der Stahlbetonarbeiten auf Grundlage eines abgestimmten Schalungskonzeptes eine Probewand betoniert. Dabei wurden verschiedene Schalungsbeläge und biologisch abbaubare Trennmittel getestet.

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 Bundesanstalt für Wasserbau wurden im Einfahrtsbereich des Unterwassers einige Flächen mit Strukturschalung belegt. Die Brücken am Unterhaupt erhielten eine scharierte Schalung.

Da der Durchfluss des Schleusungswassers in den Längskanälen, Sparbeckenzulaufkanälen, Sparbeckennotüberlaufkanälen und im Pumpkanal u.a. von der Rauigkeit der Innenschalung wesentlich beeinflusst wird, wurden hier glatte Schalungsbeläge (21 mm Sperrholzbelag, 15-fach verleimt, rohe Birke / Birke) verwendet. 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 Dreischichtenplatten (roh), die auf Träger-elementen vertikal aufgebracht wurde, verwendet. Für die sichtbaren Flächen der Betriebsräume kam eine 21 mm Betonsperrholzschalung, 15-fach verleimt, mit Filmauftrag (80-160g), aufgebracht auf Rahmenschalungen, zum Einsatz.

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 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. Hierzu zählten neben den Sohlbereichen auch die ersten 3 Wandabschnitte, da der Fuß der Außenwände 7,80 m und der der Mittelmole 12,50 m dick sind.



Die Wände wurden ab dem 3. Betonierabschnitt mit Folien abgedeckt. Mit zunehmender Wandhöhe führte die Nachbehandlung mit Folien zu erheblichen Problemen. Aus diesem Grund wurde in diesen Bereichen ein flüssiges Nachbehandlungsmittel aufgesprüht.

5.7 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung im Betonbau wurde im Bauvertrag ein abzustimmender QS-Plan vereinbart. Die 15 Seiten des QS-Plans wurden im Verlauf der Bauphase als Arbeitsunterlage 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 und Bewehrungseinbau und Einbau von Stahlteilen
7. Ausführung von Arbeits- und Dehnfugen
8. Verfahrensweise beim Auftreten von Rissen

Die Bewehrungs- und Schalungsabnahmen aller Betonierabschnitte erfolgten baubegleitend und kontinuierlich. Bei sehr großen und komplizierten Betonierabschnitten mit bis zu 1.000 t Bewehrungsstahl ist dies praktisch auch gar nicht anders möglich. Vor der eigentlichen Abnahme wurde auf der Basis von Sollmaßen ein Vermessungsprotokoll erstellt, das die Angaben zur Nachrichtung der Schalung enthielt.

Neben der Lieferscheinkontrolle wurden auch die Frischbetoneigenschaften überwacht. So wurden parallel zur Güteprüfung des Auftragnehmers 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 zerstörungsfreien Festigkeitsprüfung am Bauwerk, sichergestellt und dokumentiert.

Neben den bereits auf Großbaustellen üblichen zusätzlichen Kontrollprüfungen der Festbetonkennwerte wurden auch die Ausgangsstoffe und die Bewehrung geprüft. Folgende Prüfungen wurden vom IBMB der TU Braunschweig im Auftrag des WNA Magdeburg durchgeführt:

- regelmäßige Messungen der Kernfeuchte der Zuschläge
- stichprobenartige Bestimmung organischer Bestandteile der Zuschläge
- stichprobenartige chemische Untersuchungen des Zements
- stichprobenartige chemische Untersuchungen der Flugasche
- stichprobenartige Prüfung der Zugfestigkeit der Bewehrung
- stichprobenartige chemische Analyse des Bewehrungsstahls.