

Kuhn, Rudolf Dr.-Ing.: Die Schleusen des Main-Donau-Kanals
Rhein-Main-Donau AG, München 1971: Sonderdruck einer gekürzten Fassung aus "Der Bauingenieur", 46. Jahrgang (1971) Heft 5, Seite 163 – 184, © Springer, Printed in Germany

Abschrift: Manfred Kimmig, Burgthann, 2002 (nur Text – ohne Bilder und Graphiken)
Manfred Kimmig, Steinfeldstrasse 35, 90559 Burgthann, Tel. 09183 4569

Für die Internetpublikation überarbeitet: Hans Grüner, Nürnberg, 2009

Die Schleusen des Main-Donau-Kanals

Die Grundlage für die Planung der Schleusen:

Der Main-Donau-Kanal (MDK) ist das Herzstück des Europakanals, der Schifffahrtsverbindung zwischen den beiden großen Stromgebieten des Rheins und der Donau (Abb. 1).

Bamberg am Main und Kelheim an der Donau sind seine beiden Endpunkte. Von ihnen aus wird der Kanal über die Flussgebiete der Regnitz von Norden und der Altmühl von Süden an die Wasserscheide des Jura herangeführt.

Die Trasse des Kanals zwischen Bamberg und Nürnberg ist weitgehend durch die Topographie des Regnitztales und durch die Besiedlung des durchfahrenen Gebietes festgelegt. Das mittlere Gefälle des Längsschnittes beträgt 1,2‰. Die Stufenhöhen der Schleusen bleiben noch im bisher üblichen Rahmen, mit Ausnahme der aufeinanderfolgenden Stufen Erlangen und Kriegenbrunn, deren Höhe mit je 18,30 m das bisher größte Maß einer Schiffsschleuse im deutschen Wassertrassennetz übersteigt. Erlangen wurde dadurch zur Modellstufe für die Entwicklung der MDK-Schleuse.

Auf der Südrampe war die Trasse durch die Altmühl vorgegeben. Das mittlere Gefälle des Abschnitts ist mit 2,6‰ zwar größer als im Nordabschnitt, doch bleiben die höchsten Stufen noch unter dem Maß von Erlangen.

Demgegenüber steigt das Mittelstück des Kanals zwischen Nürnberg und der Scheitelhaltung mit 3,5‰ steil an. In diesem Abschnitt bot die Trasse zwei Stufen mit 28 m und 46 m an; die erste Projektierung zu einer Zeit, in der die höchste Schleuse in Deutschland 15 m hatte, sah hier Hebewerke vor.

Neuartige Füll- und Entleerungssysteme haben jedoch in neuerer Zeit die für Schleusen mögliche Stufenhöhe beträchtlich nach oben verschoben.

Nachdem das Gelände im Bereich der 46 m-Stufe mit einer nur geringen Trassenverschiebung eine Auflösung in zwei Stufen mit ausreichend langer Zwischenhaltung erlaubte, wurde eine Lösung ausschließlich mit Schleusen untersucht.⁰⁾ Es zeigte sich, dass die größere Leistungsfähigkeit eines einzelnen Hebewerkes in einer Schleusenkette nicht zum Tragen kommt, weil der Rhythmus von der schwächsten Schleuse bestimmt wird und somit der Zeitgewinn am Hebewerk nicht ausgenutzt werden kann. Weiterhin erwies sich das Hebewerk in der Herstellung und im Betrieb als aufwendiger gegenüber einer Schleusentreppe, und schließlich müssen Schubverbände an den Hebewerken mit ihren nur 100 m langen Trögen mit größerem Personalaufwand zerlegt und wieder zusammengefügt werden, während sie die 190 m langen Schleusen ungeteilt durchfahren können. Somit werden auch die Stufen in diesem mittleren Steilabschnitt ausschließlich mit Schleusen ausgerüstet.

Damit werden alle Stufen des MDK durch Schleusen überwunden.

Die Wasserversorgung ist dadurch charakterisiert, dass der Kanal in seinem Verlauf praktisch alle Spielarten einer Binnenwasserstraße annimmt und in der Bauausführung zwei Phasen mit verschiedenen Versorgungssystemen aufweist.

Die Haltungen Bamberg und Strullendorf bilden einen Seitenkanal der Regnitz (Abb. 1). Darin muss die Haltung Stullendorf als zusätzliche Aufgabe bis zu 50 m³ pro Sekunde Triebwasser für das Kraftwerk Hirschaid kurz oberhalb der Stufe befördern.

Die Haltung Buckenhofen im Regnitztal und die Haltungen Riedenburg und Kelheim im Altmühltal sind Stauregelungen im Fluss. Die restliche Strecke zwischen Hausen und Dietfurt ist ein Verbindungskanal, der in seinem Verlauf von keinem nennenswerten zufließenden Gewässer gespeist wird.

Der mittelfränkische Raum, durch den der Main-Donau-Kanal führt, ist ein wasserarmes Gebiet, so dass das Land Bayern seit langem eine Überleitung von Donauwasser plant. Eine Verbindung beider Vorhaben bietet sich an. Davon wird die ganze Südrampe von Kelheim bis zur Scheitelhaltung und weiter bis zur Schleuse Hilpoltstein/Nord (= heute Eckersmühlen), teilweise bis zum Hafen Nürnberg betroffen.

Die erste Bauphase umfasst die Erstellung des Nordabschnittes zwischen Bamberg und Nürnberg (Abb. 2). In diesem Stadium ist der Verbindungskanal zwischen Hausen und Nürnberg darauf angewiesen, den Schleusenverbrauch in den Haltungen wieder auszugleichen und Verdunstungs- und Versickerungsverluste von der Regnitz her zu ergänzen; die Schleusen müssen also mit Pumpwerken ausgestattet werden.

In der zweiten Phase, nach Fertigstellung des ganzen Kanals, wird die Strecke von Kelheim bis Hausen im wesentlichen durch Donauwasser versorgt, welches über die Südrampe hochgepumpt wird; dazu kommt noch das eingangs erwähnte zusätzliche Überleitungswasser. In diesem Versorgungssystem verlieren die erwähnten Pumpwerke auf der Nordstrecke zum großen Teil ihre Funktion.

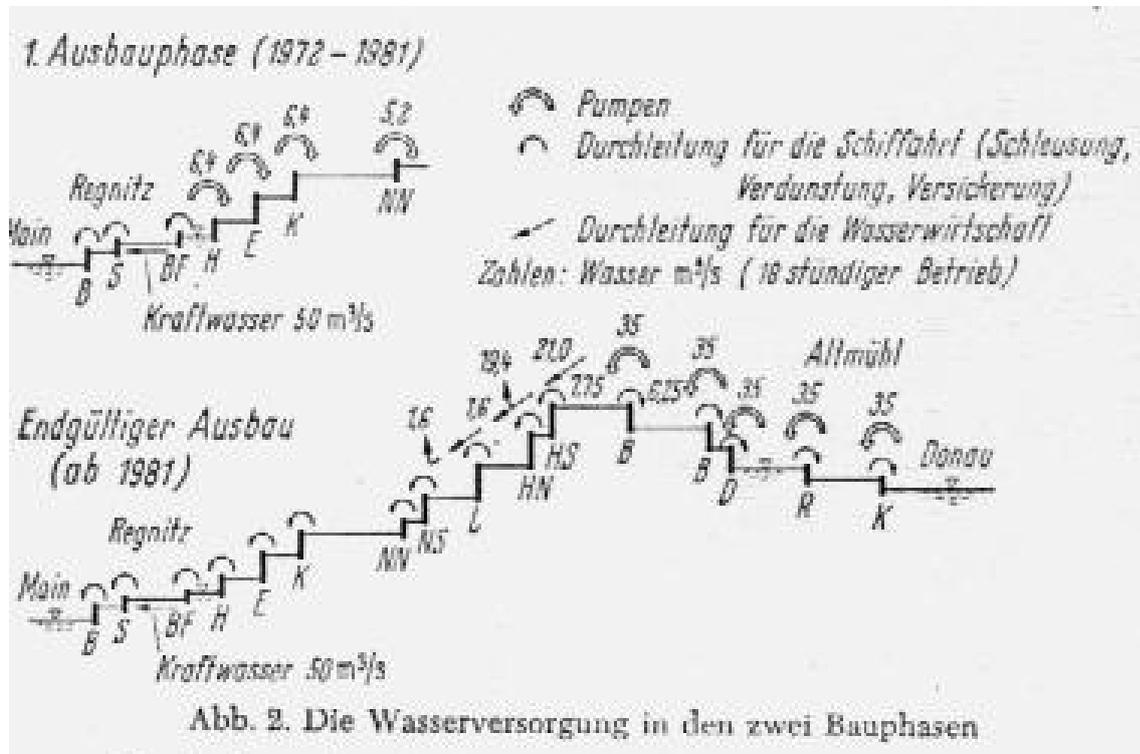


Abb. 2 Die Wasserversorgung in den zwei Bauphasen

In beiden Phasen ist die Wasserversorgung mit beträchtlichem Aufwand verbunden; um an Wasser zu sparen, sind die Schleusen des MDK Sparschleusen mit Ausnahme der Fluss-Schleusen Buckenhofen, Riedenburg und Kelheim.

Die verkehrswirtschaftliche Bedeutung des Kanals liegt darin, dass er zwei große Verkehrsräume der Binnenschifffahrt miteinander verbindet, die bisher völlig getrennt waren.

Durch diese Trennung entwickelten sich auch die Schiffstypen, Schiffsgrößen und Betriebsgepflogenheiten in jedem dieser Räume in eigener Weise.

Im Zuge der Vereinheitlichung der europäischen Wasserstraßen steuerte aber die Planung auf beiden Seiten schon seit geraumer Zeit und nicht zuletzt gerade im Hinblick auf die erwartete Verbindung auf eine einheitliche Linie zu. Das Ergebnis der gemeinsamen Vereinbarungen war die Wasserstraßeneinteilung und die Festlegung ihrer Typschiffe und damit auch eine einheitliche Konzeption für die Planung der verbindenden Wasserstraße.

Der Main-Donau-Kanal gehört der Wasserstraßenklasse IV an; ihr Typschiff ist das "Europaschiff" mit 80 m Länge, 9,5 m Breite und 2,5 m Tiefgang; demnach sind die Schleusen 12,0 m weit und die Fahrwassertiefe (Drempeltiefe) beträgt 4,0 m. Die Schleusenlänge (zwischen den Toren) wurde von der Verwaltung im Jahre 1956 zunächst auf 165 m festgelegt; maßgebend hierfür war die Annahme über die zu erwartende Zusammensetzung des Schiffsparks, bei dem die Zahl der "Europaschiffe" noch mit etwa 30% eingesetzt war.

Die starke Zunahme dieses Schiffstyps und das Aufkommen der Schubverbände veranlasste jedoch die Rhein-Main-Donau AG, die mit dem Bau der Wasserstraße betraut ist, als Länge der Schleusenammern 190 m vorzuschlagen; für Motorgüterschiff-Schubverbände von 160 m Länge reichen 165 m für ein zügiges Einfahren nicht aus, und für einen Schubverband werden 180 bis 185 m benötigt.

Danach entschied sich das Bundesverkehrsministerium für die Länge von 190 m, die bei allen Schleusen des MDK als Nutzlänge zwischen den Sicherheitsmarken eingehalten wird.

Auch den Schubverband "Europa II" mit $30 + 2 \times 76,5 = 183,0$ m Länge und 11,4 m Breite werden die Schleusen des MDK aufnehmen können.

Die lichte Durchfahrtshöhe ist für den MDK allgemein auf 6,00 m festgesetzt, darüber hinaus wird die mögliche Anhebung des Wasserspiegels durch Schwall, Windstau, Kleinspeicherung usw. berücksichtigt.

Die theoretische Leistungsfähigkeit der MDK-Schleuse, ausschließlich von ihrer wasserbaulichen Ausstattung her gesehen, beträgt bei einer Zeitdauer der Kreuzungsschleusung von etwa 62 Minuten im 24stündigen Betrieb an 365 Tagen im Jahr mit 2.700 t Nutzlast je Kammerfüllung rund 46 Millionen Tonnen per Anno.

Setzt man dagegen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Gegebenheiten des Schifffahrtbetriebes und der Witterung maximal 1.500 t je Füllung und einen 16stündigen Betrieb an 300 Tagen im Jahr an, dann ergeben sich rd. 13,5 Millionen t/a. Wenn sich im Laufe der Jahre das tatsächliche Aufkommen diesem Wert nähert und der 16stündige Betrieb beibehalten wird, muss eine zweite Schleuse gebaut werden. An allen Stufen ist der dafür notwendige Platz eingeplant.

Das System der Sparschleusen am MDK:

Im Bereich der MDK-Sparschleusen steht genug Platz zur Verfügung, so dass die zwar Raumsparende, aber aufwendigere Lösung mit übereinander, gedeckten Sparskammern vermieden und die wirtschaftlichere, offene Bauweise mit treppenförmig angeordneten Becken angewendet werden konnte.

Für die Füll- und Entleerungseinrichtungen wurde das Grundlaufsystem gewählt; dem größeren baulichen Aufwand stehen ein unvergleichlich ruhigerer Schleusungsvorgang und damit die Möglichkeit höherer Fördergeschwindigkeit gegenüber.

Von diesen Grundkonzeptionen ausgehend entwickelten das Theodor-Rehbock-Institut der Technischen Universität Karlsruhe und die RMD AG gemeinsam eine Sparschleuse eigener Prägung, die in vielen Teilen auf Bewährtes zurückgreift und darüber hinaus neue Erkenntnisse und Erfahrungen weitgehend verwertet.

Die Hauptelemente sind die Kammer und die neben ihr treppenförmig ansteigenden Sparbecken, die in der Mitte ihrer Längsseite durch Querwände in zwei Abschnitte unterteilt werden (Abb. 3 u. 4). Das Füll- und Entleerungssystem umfasst die Längskanäle zu beiden Seiten der Kammer, den Grundlauf in der Kammersohle, bestehend aus 2 getrennten Systemen in den beiden Kammerhälften, und die Querkanäle, welche die Sparbecken mit dem Grundlaufsystem verbinden.

Jeder Längskanal ist nur mit einem der beiden Grundlaufsysteme verbunden, der sparbeckenseitige Kanal mit dem unterstromigen System und der landseitige Kanal mit dem oberstromigen System; ihre Verschlüsse sind in den Häuptern untergebracht.

Zwischen dem untersten Sparbecken und dem Längskanal liegen die Verschlüsse der Querkanäle; sie sind doppelkehrend mit Rücksicht auf die wechselnde Beanspruchung je nachdem, ob das Wasser in der Kammer oder im Sparbecken höher steht. Über den Verschlüssen liegen ihre Antriebe in einer Maschinenhalle.

Die Grundlaufsysteme besitzen je einen Mittelkanal, der sich von der erweiterten Einmündung der Querkanäle nach beiden Seiten erstreckt. Seine Enden münden in die Seitenkanäle, in deren Decke zahlreiche, lotrechte Stichkanäle die Verbindung zur Schleusenammer herstellen; ihre große Zahl und ihre Verteilung über den größten Teil der Kammerlänge haben zur Folge, dass das senkrecht ausströmende Wasser den kürzesten Weg zur Füllung der Kammer nehmen kann. Der Schleusungsvorgang wird dadurch bei einem Betrieb mit allen Sparbecken so ruhig, dass die Schiffer erfahrungsgemäß nicht mehr festmachen. Die Anordnung der Öffnungen auf den beiden Seiten bewirkt lediglich eine leichte Strömung zur Mittelachse hin, die vorteilhaft ist, weil sie die Lage der Schiffe zentriert.

In der unteren Mündung des Querkanals muss die lichte Höhe, die im Verschlussbereich 2,60 m beträgt, der Grundlaufhöhe mit 1,70 m angepasst werden (Abb. 7).

Die Modellversuche für die Schleuse Erlangen erforderten für die Mündungsstrecke eine größere Länge, als sie durch die Breite der Maschinenhalle zur Verfügung stand; sie konnte nur durch die Einschaltung eines Zwischenraumes zwischen Kammerwand und Maschinenhalle erreicht werden.

Bei den neueren Versuchen des Instituts in Karlsruhe für die Südstrecke wurde die lichte Höhe des Querkanals in der Einmündung mit 2,60 m weitergeführt. Durch die günstigere Strömung kann die Länge des Kanals kleiner gehalten werden, so dass der Zwischenraum wegfällt.

Der Schleusungsvorgang spielt sich folgendermaßen ab (Abb. 5): Bei der Talfahrt eines Schiffes wird zunächst der Querkanal zum obersten Sparbecken geöffnet; eine Wassermenge gleich dem dargestellten obersten Abschnitt 1 in der Kammer fließt in das Becken. Je mehr sich die Wasserspiegel in der Kammer und im Becken ausgleichen, desto geringer werden das Druckgefälle und damit die Strömungsgeschwindigkeit. Um den Vorgang nicht unnötig lange hinauszuziehen, wird der Querkanal wieder verschlossen, wenn zwischen dem Wasserspiegel a in der Kammer und demjenigen im

Sparbecken noch eine geringere Restfallhöhe von 15 cm vorhanden ist. Dann wird der Verschluss zum mittleren Sparbecken geöffnet und das Spiel wiederholt sich hier. In der gleichen Weise wird das unterste Sparbecken gefüllt. Die danach in der Kammer über dem Pegel des Unterwassers verbleibende Wassermenge V wird anschließend über die Längskanäle ins Unterwasser abgelassen; diese Wassermenge stellt das Verbrauchswasser des Schleusungsvorganges dar.

Bei der folgenden Bergfahrt wiederholt der Füllvorgang das Spiel in umgekehrter Reihenfolge. Zuerst wird der Querkanal zum untersten Sparbecken geöffnet und der Beckeninhalt 3 fließt aus der Kammer in das Becken; wenn sich die beiden Wasserstände bis auf die Restfallhöhe von 15 cm ausgeglichen haben, wird das Schütz geschlossen. Das gleiche wiederholt sich beim mittleren und anschließend beim obersten Sparbecken. Die danach verbleibende Fehlmenge an Wasser in der Kammer ist gleich der bei der Talfahrt erwähnten Verbrauchswassermenge V ; sie wird zum Schluss des Füllvorganges über die Längskanäle dem Oberwasser entnommen. Bei einer Kreuzungsschleusung fließt also die Verbrauchswassermenge V vom Oberwasser ins Unterwasser.

Die Wasserersparnis, die auf die geschilderte Weise erzielt werden kann, hängt von der Zahl der Sparbecken und ihrer Größe ab. Das wirtschaftliche Optimum ergibt sich bei 3 Sparbecken mit gleicher Grundfläche wie die Kammer zu 59% Wasserersparnis. Darauf sind die hohen Schleusen des MDK abgestimmt. Für die Schleusen mit geringerer Stufenhöhe war oft der Gesichtspunkt der Anpassung des Wasserverbrauchs an benachbarte, höhere Stufen maßgebend, so dass sich auch Lösungen mit anderer Beckenzahl und Grundfläche finden.

Während des Füll- und Entleerungsvorganges werden die Antriebe der Längs- und Querkanalverschlüsse durch eine Programmsteuerung ein- und ausgeschaltet. Außer dem Normalprogramm des geschilderten Füll- und Entleerungsvorganges, also unter voller Ausnützung des Sparsystems, sind noch weitere Programme vorhanden für die Fälle, dass die Sparbecken einzeln oder insgesamt ausfallen oder dass ein Längskanal außer Betrieb ist.

Darüber hinaus können alle Verschlüsse einzeln von Hand gesteuert werden.

Die Füll- und Entleerungswassermengen werden den Haltungen entnommen und wieder in sie eingeleitet; um zu große Schwall- und Sunkerscheinungen zu vermeiden, wurden sie jeweils auf $70 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt. Dadurch ergaben sich für die hohen Schleusen der Nordstrecke mittlere Hub- und Senkgeschwindigkeiten von $1,1 \text{ m/min}$; sie werden bei den höchsten Schleusen der Südstrecke zur Anpassung an die Gesamtschleusungszeit zwischen $1,5$ und $1,6 \text{ m/min}$ betragen. Durch die getroffene Wahl der Füll- und Entleerungswassermenge liegen die Kräfte, welche durch die Strömungsvorgänge in der Kammer und in den Vorhäfen auf die Schiffe ausgeübt werden, in dem für die Schifffahrt erträglichen Rahmen bzw. erheblich darunter.

Der Wasserhaushaltsplan des MDK weist den Schleusen in der Regel neben der Wasserersparnis noch die Aufgabe zu, je nach Bedarf Wasser von der unteren Haltung ins Oberwasser hinaufzupumpen und umgekehrt Überschusswasser von der oberen Haltung ins Unterwasser abzulassen. Pumpwerk und Leerschuss werden damit zu einem wesentlichen Bestandteil der meisten Schleusen am Main-Donau-Kanal.

Die Pumpanlage besteht aus dem eigentlichen Pumpwerk unterhalb des Unterhauptes mit dem Einlauf im unteren Vorhafen und dem Pumpenkanal, der vom Pumpwerk entlang der landseitigen Kammermauer über das Oberhaupt hinaus zum oberen Vorhafen verläuft und an beiden Enden einer gabelförmigen Teilung in einer Auslaufkonstruktion endet (Abb. 3).

Als Leerschussleitung in umgekehrter Richtung erhält der Kanal an seinem unteren Ende neben den Pumpen einen Leerschussauslauf mit einem Verschlussorgan.

Somit besitzen die Sparschleusen des MDK drei Einrichtungen zum Regulieren der Wasserstände in den Haltungen: die Sparbecken, das Pumpwerk und den Leerschuss. Es bedarf sehr sorgfältiger Überlegungen, wie diese Regulierungsfaktoren technisch und wirtschaftlich optimal eingesetzt werden. Die Notwendigkeit, die Steuerungsvorgänge aller Schleusen in der Kette aufeinander abzustimmen, wird eine zentrale Stelle zur Folge haben, die im Raum Nürnberg geplant ist.

(Abbildung 6 zeigt die Sparschleuse Hausen mit 2 Sparbecken und dem Pumpwerk im Vordergrund links. Zur Zeit der Aufnahme war die Schleuse trockengelegt; in Höhe des Pumpwerks ist der Notverschluss zu erkennen.) (= Fotografie der Abbildung 6 liegt mir nicht vor)

Der Schleusentiefbau:

Bemessung der wasserspiegelabhängigen Größen:

Die Höhe des Wasserspiegels in den Haltungen schwankt durch die Schwall- und Sunkerscheinungen infolge Entnahme und Rückgabe des Schleusungsverbrauchswassers und durch die Wasserdurchleitung und –Speicherung. Danach müssen sich die Höhe des Freibords zwischen Wasserspiegel und Schleusenplattform bzw. Vorhafenplattform, die lichte Durchfahrtshöhe am Unterhaupt und der Freibord des Obertores richten (wie auch die lichten Höhen der Brücken, die über den Kanal führen). Schwall und Sunk durchlaufen die Haltungen, werden an den Schleusen reflektiert und pendeln viele Stunden lang hin und her, sich mit neuen Wellen aus dem Schleusungsbetrieb überlagernd.

In eingehenden Berechnungen der Technischen Universität Karlsruhe wurden alle Vorgänge untersucht und das Ergebnis der Bemessungen der wasserspiegelabhängigen Größen zugrunde gelegt.

Kammer und Sparbecken:

Sohle und Wände der Schleusenammer sind zu einem biegungsfesten, U-förmigen Rahmen zusammengefaßt (Abb. 4).

Auf der Sparbeckenseite bilden der Mauerfuß und die Sohle der Maschinenhalle mit Rücksicht auf die hohe Belastung der Mauer durch den Wasserdruck der Kammer eine weit ausladende Gründungs-Konstruktion (Abb. 7).

Für die aufgehende Kammermauer über dem Maschinenhausfußboden genügte bei den Stufenhöhen bis 9 m noch eine einfache Wand; an den höheren Stufen bis 12 m erhält diese eine voutenförmige Verstärkung an der Einspannstelle in die Gründungskonstruktion.

In Erlangen und Kriegenbrunn dagegen wird die Wand durch Rippen ausgesteift, die noch im Raum zwischen Maschinenhalle und Kammerwand untergebracht werden konnten (Abb.8)

Die Kammermauern sind in der Längsrichtung der Schleuse durch Dehnungsfugen in 13 Lamellen von rd. 12,3 m Länge unterteilt (Abb. 3). Dieses Maß erhöht sich im Bereich der Sparbeckenzuläufe auf 14,5 m, um alle 3 Querkanäle in einer Lamelle unterzubringen; zum Längenausgleich haben die beiderseits anschließenden Lamellen nur 11,2 m Länge. Bei der Festlegung des Grundmaßes war man von der Erfahrung ausgegangen, dass die Rissbildung nur in Blöcken mit einer Länge dieser Größenordnung in erträglichen Grenzen gehalten werden kann.

Die Sparbecken werden seitlich durch Längs- und Quermauern abgegrenzt; zwischen ihnen liegen die Sohlenplatten, welche die Becken nach unten abdichten (Abb. 4 und 9).

Die Querkanäle münden in die Sparbecken mit einer trompetenförmigen Aufweitung, an deren unterem Ende ein Gitterrost zur Beruhigung des ein- und ausströmenden Wassers eingeschaltet ist; an seine Stelle werden auf der Südstrecke gekrümmte Leitwände mit günstigerem hydraulischen Wirkungsgrad treten. Hinter dem Schütz nach der Kammer zu wurde auf Empfehlung des Wasserbauinstitutes der Technischen Universität München in den Zwischenwänden der 3 Querkanäle je eine Öffnung ausgespart, durch welche sich der Druck im durchströmten Kanal mit dem statischen Druck des benachbarten nicht durchströmten Kanals ausgleichen kann, so dass gefährliche Unterdrücke vermieden werden (Abb.10). Dem gleichen Zweck dienen Belüftungsrohre, die bis zur Schleusenplattform hochgeführt werden.

Die Maschinenhalle nimmt die Antriebe für die Querkanalverschlüsse auf (Abb.10 und 11). In ihr sind auch die Reserveschütze und Notverschlüsse für Längs- und Querkanäle gelagert. Zum Heben und Senken der schweren Lasten von Verschluss und Notverschluss

und zum Ein- und Ausbau dieser Teile ist die Halle mit einem in Längsrichtung laufenden Kran von 5 Mp Tragfähigkeit ausgestattet. Im Stahlbetondach mit Feuchtigkeitsisolierung und Kiesschüttung sind zur Beleuchtung der Halle Plexiglaskuppeln angebracht. An beiden Dachenden befinden sich Montageöffnungen mit leicht abnehmbaren Kuppeln.

Ein Drainagesystem hat die Aufgabe, den die Schleuse umgebenden Grundwasserspiegel auf eine statisch zulässige Höhe abzusenken; seine Wirksamkeit wird durch ständige Beobachtung überprüft. Auf der Landseite verläuft eine Entwässerung hinter der Kammerwand vom Oberhaupt bis zum Auslauf am Unterhaupt (Abb. 4). Über den Sohlenplatten der Sparbecken sind in einer Entwässerungsschicht quer verlaufende Filterrohre eingebettet, die in Drainagegängen in den Sparbeckenmauern enden; diese Längsgänge münden am unterstromigen Ende der Sparbecken in einem Quergang mit Vorflut ins Unterwasser.

Die Häupter

In beiden Häuptern bildet die Torlamelle mit Auflagerung, Führung und Antrieb des Schleusentores das Mittelstück (Abb. 3); kammerseitig schließt sich die Schützlamelle an, in der die Längskanalverschlüsse samt Notverschlüssen untergebracht sind (Abb.12), und haltungsseitig bestimmen die Mündungssysteme der Längskanäle Größe und Gestaltung der anschließenden Lamellen.

Im Mittelpunkt der Schützlamelle steht der Längskanalverschluss. Sein ölhydraulischer Antrieb befindet sich im darüberliegenden Verschluss-Schacht. Auf der unterstromigen Seite des Verschlusses könnte bei teilweise gehobenem Schütz ein unzulässig hoher Unterdruck entstehen; zum Druckausgleich wird dieser Teil des Längskanals über 2 Rohre belüftet.

Die Plattformen der Tor- und Schützlamellen bilden Arbeitsplätze für Reparaturarbeiten an den Toren und Verschlüssen. Sie sind von den Zufahrten aus erreichbar und so breit und stabil angelegt, dass sie von schweren Autokranen befahren werden können (Abb. 3).

Die Einlauflamelle des Oberhauptes ist im Wesentlichen von den hydraulischen Forderungen der Längskanalmündungen geformt. Die Einlauftrichter (Abb. 3 u. 13) weisen im Längsschnitt eine doppelt gekrümmte, S-förmige Mittellinie und gleichzeitig eine starke horizontale Verengung auf. Die Anordnung der Einlauftrichter macht es notwendig, die Schleuseneinfahrt im Anschluss an das Obertor noch über die Länge der Einlauflamelle fortzusetzen. In dem so entstandenen Gerinne ist der oberstromige Notverschluss der Schleuse untergebracht.

Die unterstromige Auslauflamelle ist in die sich öffnende Erweiterung des Fahrwassers eingebunden; die Verschwenkung 1:5 der Mauern kommt der gestuften Anordnung der Auslauföffnungen entgegen, in die der Längskanal durch Leitwände aufgespalten wird (Abb. 3). Unterhalb des Auslaufs liegt der unterstromige Notverschluss.

Die Schleusenaufbauten enthalten an den beiden Häuptern die Antriebsorgane der Schleusentore. Am Untertor kommt das Schleusensteuerhaus hinzu, das bei den ersten Ausführungen der Nordstrecke bis Hausen auf der Landseite parallel zur Schleuse liegt (Abb.14) und von Erlangen ab wegen der besseren Übersicht über Schleuse und Vorhafen quer über der Schleusenkammer in Höhe des unteren Tores angeordnet ist (Abb.15). An den hohen Schleusen zwischen Hausen und Dietfurt verbindet ein Lift die unterstromige Plattform mit dem Steuerstand.

Die Schleusenbrücke unmittelbar im Anschluss an die untere Torlamelle überspannt die unterstromige Schleuseneinfahrt. Bei den niedrigen Stufen liegt diese Brücke in Höhe der Schleusenplattform; bei den hohen Stufen war es architektonisch günstiger und erheblich

wirtschaftlicher, die Höhe über dem Unterwasser etwa wie bei den niedrigen Schleusen beizubehalten.

Die Leitwerke und Vorhäfen

Die geraden Leitwerke sind 1:5 gegen die Schleusenachse verschwenkt (Abb. 3). Auf der Südstrecke entschied man sich nach einer anfänglichen Planung von Schubmolen in gerader Verlängerung einer Kammerwand letzten Endes für eine Lösung nach holländischem Vorbild, demgemäß die verschwenkten Leitwerke zur Kammerwandflucht mit einer zügigen Kurve angeschlossen werden.

Am Oberhaupt besteht das Leitwerk (siehe Foto oben) aus einem winkelförmigen Stahlbetonbalken, der als durchlaufender Träger auf unten eingespannten Säulen ruht und an seinen Enden auf die Einlauflamelle bzw. die Ufermauer aufgelagert ist (Abb.13). Sein senkrechter Querschnittsteil taucht 1,00 m ins Wasser ein und bildet so eine gewisse Schutzwand gegen Querströmungen im Bereich der Schiffseintauchtiefe.

Am Unterhaupt besteht das Leitwerk auf beiden Seiten aus einer massiven Ufermauer. Sparbeckenseitig wird sie bis zum Anschluss an die achsenparallelen Vorhafenmauern geführt.

Auf der anderen Seite dagegen geht das Leitwerk am Auslauf des Pumpwerkes in einen Balken wie am Oberhaupt über, um den Zu- und Abfluss des Wassers zu den Pumpen und den Leerschuss freizugeben (Abb. 3 und 16).

Die Vorhäfen werden auf der Sparbeckenseite durch eine senkrechte Mauer begrenzt; dieser Teil ist als Warteplatz bestimmt (Abb. 6).

Das gegenüberliegende Ufer, das beim Bau der zweiten Schleuse zurückverlegt werden muss, ist außerhalb der Leitwerke als einfache Böschung mit einer Neigung von 1:3 ausgeführt und dient als Schiffs- und Sportbootliegeplatz. Auf dieser Seite sind in der Uferböschung breite Treppen für das Umsetzen von Sportbooten angelegt.

Tore und Verschlüsse

Gesamtplanung:

Der Stahlwasserbauentwurf strebte an, die Zahl der Typen bei den Toren und Verschlüssen gering zu halten. Nach Möglichkeit wurden die Ausführungen in Gruppen zusammengefasst, innerhalb derer die Tore bzw. Verschlüsse einander soweit gleichen, dass sie ausgetauscht werden können. Diese Vereinheitlichung macht es wirtschaftlich tragbar, für jede Gruppe ein Reservestück zu beschaffen und bereitzuhalten, so dass im Falle einer Beschädigung das Tor oder der Verschluss nur ausgewechselt zu werden braucht. Es liegt auf der Hand, dass auf diese Weise die Stillstandszeiten der Schleuse und damit die Zeiten für notwendige Schifffahrtssperren auf ein Mindestmaß gesenkt werden. Der dadurch gegebene Vorteil rechtfertigt auch gewisse Mehraufwendungen, die bei jeder Vereinheitlichung unvermeidbar sind.

Für die Obertore gibt es zwei Gruppen, nämlich eine Ausführung als Hub-/Senktor mit Stützbalken auf der Nordstrecke und ohne Stützbalken auf der Südstrecke einschließlich der Altmühlstufen.

Das Untertor hat 3 Typen verschiedener Tragfähigkeit je nach der Stufenhöhe, nämlich für Höhen bis 12, 18 und 24 m. Die gleiche Unterscheidung nach ähnlichen Höhenstufen ist bei den Längskanalverschlüssen getroffen; dazu kommt noch eine besondere Gruppe für die beiden Altmühschleusen, deren Füllsystem von demjenigen der Sparschleusen abweichend nur aus Längs- und Stichkanälen besteht.

Bei den Sparbeckenverschlüssen schließlich sind 2 Gruppen vorhanden, nämlich die eine für Stufen bis 17 m und die andere darüber.

Die Typen der Notverschlüsse sind denen der Längskanalverschlüsse bzw.

Querkanalverschlüsse angepasst.

Sonderfälle außerhalb der aufgeführten Gruppen sind die Tore in Buckenhofen, die als einzige des MDK zur Füllung und Entleerung herangezogen werden, und die Untertore der beiden Altmühlstufen, für welche Stemmtore vorgesehen sind.

Obertor

Die Obertore sind durchwegs Hubsenktore (Abb.17). Die Wahl dieses Typs ist begründet durch den Wunsch der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, durch Senken des Tores gegen den vollen Wasserdruck eine Strömung herbeizuführen, z.B. zur Abfuhr von Eis und Treibzeug.

Die Stauwandoberkante liegt bei den Toren der Nordstrecke 40 cm über dem Normalwasserspiegel; dieses Maß setzt sich aus einem möglichen Überstau von 30 cm und 10 cm Wellenschlag zusammen. Zur Abfuhr von Eis und Treibzeug wird das Tor um 50 cm unter den Oberwasserspiegel, zur Freigabe der Schleuseneinfahrt um insgesamt 6,00 m in die Tieflage abgesenkt.

Das Torgewicht wird zur Entlastung der Antriebe durch zwei Gegengewichte aus Schwebbeton zum größten Teil ausgeglichen; ein voller Gewichtsausgleich ist nicht erwünscht, um Wechselbelastungen auf die Antriebsorgane zu vermeiden und damit ein ruhiges Fahren zu gewährleisten. Die kubischen Gegengewichte fahren in Schächten seitlich Oberstrom des Tores; sie sind mit ihm durch Drahtseile verbunden. Das Tor wird von zwei Windwerken – je eines auf jeder Seite – über Gelenkzahnstangen angetrieben. Zur Revision oder Reparatur wird das Tor gehoben, bis seine Unterkante rd. 50 cm über dem Normalwasserspiegel liegt. In dieser Höchstlage kann es durch zwei Haken, je einer auf jeder Seite, verriegelt werden.

Zur Dichtung des Tores in der Schließstellung sind auf den Seiten und am unteren Rand Wulstgummi angeordnet, die durch den Druck des Oberwassers gegen einen Dichtrahmen aus nichtrostendem Stahl gedrückt werden.

Auf dem Dremmel unmittelbar oberhalb des Tores liegt eine Luftsprudelleitung, um das Tor im Winter eisfrei zu halten.

Untertor

Die Sparschleusen des DMK sind Schachtschleusen; für sie bot sich ein Hubtor als unterstromiger Abschluss der Kammer an.

In Buckenhofen wurde ein Hubdrehtor gewählt, weil bei der geringen Stufenhöhe ein Hubtor unschöne, übermäßig hohe Aufbauten am Unterhaupt erfordert hätte. An den beiden Schleusen der Altmühl sind Stemmtore vorgesehen.

Die erste Gruppe der Hubtore umfasst die Schleusen Bamberg, Strullendorf, Hausen und Nürnberg-Nord; sie ergibt sich aus der gleichen Größenordnung der Stufenhöhen. Nachdem aber doch die für das Tor maßgebenden Belastungen und Wasserstände verschieden sind, stellt die einheitliche Ausführung des Tores eine Kompromisslösung dar.

Die beiden Stufen Erlangen und Kriegenbrunn sind einander völlig gleich, so dass die Tore dieser zweiten Gruppe nach Größe und Tragfähigkeit voll ausgenutzt werden konnten; das gleiche gilt für die hohen Stufen der Südstrecke (Nürnberg-Süd, Leerstetten, Hilpoltstein-Nord (= neu: Eckersmühlen), Hilpoltstein-Süd, Bachhausen, Berching und Dietfurt), deren Tore die dritte Gruppe bilden.

Abgesehen von den aufgeführten Einzelheiten sind die Tore in ihrem grundsätzlichen Aufbau einander so weitgehend gleich, dass sie zusammen behandelt werden können.

Die Torkonstruktion besitzt zwei waagrechte, verschraubte und gedichtete Stoßfugen, so dass sie zerlegt und in einzelnen Stücken transportiert werden kann.

Um die Hebezeuge in einem tragbaren Rahmen zu halten, ist das größtzulässige Gewicht

eines Einzelteiles in der Nordstrecke auf 28 Tonnen festgesetzt. Die Höhe der unteren Teile ist für alle Tore mit je 4,50 m die gleiche; nachdem Abbau der oberen Teile ragt der unterste Schuss also noch 0,5 m aus dem Wasser, so dass er ohne Taucher herausgeholt werden kann.

Als Beispiel für die Konstruktion und ihrem Antrieb ist das Untertor der Schleuse Erlangen in der Abbildung 18 dargestellt.

Das Tor wird durch Antriebe über Gelenkzahnstangen bewegt. Zu ihrer Entlastung sind wie beim Obertor Gegengewichte vorhanden, die mit dem Tor durch Drahtseile verbunden sind.

In der Höchstlage kann das Tor auf zwei Verriegelungsstempel abgesetzt werden, die durch einen Hebel seitlich unter die Aufhängungskonsolen für Gegengewichtsseil und Gelenkzahnstange ausgeschwenkt werden.

Verschlüsse:

Die Verschlüsse der Längskanäle und der Querkäle sind Rollschützen, die in lotrechten Führungen laufen und ölhydraulisch angetrieben werden (Abb. 12 und 10).

Von einer Aufhängeöse am oberen Ende des Schützes führt eine Kolbenstange zum Antriebskolben, der in einem Zylinder durch Öldruck auf und ab bewegt wird.

Das Längskanalschütz wird in der Schließlage auf der Stauwandseite an allen 4 Rändern durch Gummiprofile gedichtet. Ober- und unterstromig jedes Verschlusses befindet sich je ein Notverschlusschacht, in dem jeweils eine Gleittafel eingesetzt werden kann.

Beim Sparbeckenverschluss wirken sich die besonderen Anforderungen, die sich aus der Aufgabe als doppelkehrendes Schütz ergeben, in erster Linie auf die Auflagerung und auf die Dichtung aus. Die Hauptlaufrollen bewegen sich zwischen zwei Flachstahlschienen mit einem Spiel von 2 bis 3 mm, d.h. das Schütz verschiebt sich bei einem Wechsel der Belastungsseite nur um diesen Betrag. Dadurch ist es möglich, die Dichtung – für beide Belastungsseiten wirkend – auf *einer* Seite anzuordnen. Im Falle einer Revision oder einer Reparatur bereitet es keine Schwierigkeiten, das Sparbecken ganz leer zu pumpen. Es ist also nur *ein* Notverschluss kammerseitig des Sparbeckenverschlusses erforderlich.

Pumpwerk und Leerschuss:

Für die Pumpwerke ergeben sich hinsichtlich der Leistung zwei Gruppen. Auf der Nordrampe müssen die Anlagen von Hausen bis Nürnberg/Nord 6,4 bzw. 5,2 m³/s und auf der Südrampe die Anlagen von Kelheim bis Hilpoltstein (frühere Bezeichnung Hilpoltstein-Süd) 35 m³/s (= 35 Kubikmeter pro Sekunde) fördern. Demgegenüber benötigen die Stufen von Nürnberg-Süd (= neu: Schleuse Eibach) bis Hilpoltstein-Nord (= Eckersmühlen) nur eine Leistung von 0,4 m³ pro Sekunde.

Demnach umfasst die erste Gruppe voll ausgebaute Anlagen mit 2 bzw. 5 Aggregaten von 3,2 bzw. 7,0 Kubikmeter pro Sekunde Einzelleistung, während die Bauwerke der zweiten Gruppe nur als Teilausbau entworfen sind und zwar so, dass das Bestehende in einfacher Weise zu einer vollen Anlage ergänzt werden kann.

Die Ausdehnung des Pumpwerkes (Abb. 19 und 20) quer zur Schleusenachse und damit auch die Breite jedes einzelnen Aggregatblocks sind im Hinblick auf den Bau der zweiten Schleuse begrenzt. Dies veranlasste eine hydraulisch besonders günstige Form der Pumpenzulaufkammer nach Art des Saugschlauchs einer Wasserkraftanlage. An das aufsteigende Ende schließt sich eine Konus-Probellerpumpe an. Am oberen Ende der Pumpe zweigt mit einem rechtwinkligen Krümmer die waagrechte Druckleitung ab; sie mündet in eine für alle Aggregate gemeinsamen Druckkammer, an die sich der Pumpenkanal anschließt. Er besitzt einen verhältnismäßig großen Querschnitt, um die Fließgeschwindigkeit und damit die Pumpenleistung möglichst klein zu halten. Seine oberstromige Mündung ist symmetrisch zur Schleusenachse ausgebildet, um für

die Schifffahrt schädliche Querströmungen zu vermeiden (Abb.3).

Gegenüber den vorstehend beschriebenen Anlagen im Vollausbau sind die Pumpen der Stufen zwischen Nürnberg und der Scheitelhaltung (am Oberhaupt der Schleuse Hilpoltstein-Süd beginnend) mit einer Leistung von nur $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ in Bauwerken untergebracht, die, wenn notwendig, als Einlaufkonstruktion in eine spätere voll ausgebaute Anlage eingefügt werden können.

Der Leerschuss liegt in gerader Verlängerung des Pumpkanals unterhalb der Abzweigung zur Druckkammer. Er besteht aus einem Rohr, dessen Durchmesser je nach der abzuführenden Wassermenge zwischen 0,8 m und 1,5 m liegt. Eine Ausnahme bildet der Leerschuss an der Schleuse Hausen, der zusätzlich das Hochwasser des in die Haltung Hausen einmündenden Seebachs ableiten muss. Er wird wie beim Längskanal durch den Rollschütz abgeschlossen.

Eine für die Schifffahrt wichtige Frage ist die Entstehung von störenden Strömungen in den Vorhäfen bei der Aufnahme und Rückgabe von Pumpwasser und bei Abführung von Leerschusswasser.

Zu ihrer Beantwortung hat die Technische Universität Karlsruhe umfangreiche Berechnungen und Modellversuche durchgeführt.

Für den Oberhafen stellen der Austritt des Pumpwassers und die Entnahme von Leerschusswasser die maßgebenden Fälle dar. Die auftretenden Querströmungen bleiben jedoch unter der noch zulässigen Geschwindigkeit von 0,3 m je Sekunde.

Im Unterhafen stört die Entnahme des Pumpwassers in keinem Fall. Dagegen ist die Einleitung von Leerschusswasser bei Schifffahrt nur bis 5 Kubikmeter je Sekunde noch zulässig; bei den Stufen mit größeren Wassermengen muss die Trennwand zwischen Unterhafen und Pumpwerkeinlauf verlängert werden, bis sich der einseitig austretende Leerschussstrahl auf die ganze Breite des Einlaufs verteilt hat.

Ausrüstung

Auf der Schleusenplattform trägt jede zweite Lamelle einen Kantenpoller (Abb.21). In den Vorhäfen sind Kantenpoller an der Liegeplatzseite auf der Mauer und an dem gegenüberliegenden geböschten Liegeplatz auf eigenen Betonfundamenten angeordnet. In der Schleusenammer sind Nischenpoller in jeder Lamelle eingebaut (Abb. 3). Auf der Südstrecke werden zur Erleichterung des Schleusungsbetriebes mehrere Nischenpollerreihen durch Schwimmpoller ersetzt werden.

Steigleitern sind nur in der Kammer eingebaut (Abb. 3 und 21).

In Erlangen mit 23,3 m Wandhöhe sind die Leitern nach der Norm mit Sprossen parallel zur Wandflucht angeordnet. Im Allgemeinen aber sollte als Maßstab für die Steighöhe über dem Unterwasser bzw. für die Fallhöhe beim Absturz gelten, dass der fallende Körper nicht das bremsende Wasserpolster durchschlägt und hart auf der Sohle auftrifft. Für die Schleusen der Südstrecke wurde daher festgelegt, dass von einer Stufenhöhe ab 15 m die Leitern nur bis zu einer Höhe von 6,00 m über der Sohle nach der Norm ausgeführt und darüber um 90° gedreht in Nischen untergebracht werden.

Die Sicherheitsüberlegungen, die zu den oben beschriebenen Nischenleitern führten, veranlassten auch, bei allen Schleusen des MDK mit einer Stufenhöhe über 15 m ein Geländer von 90 cm Höhe entlang der Kammermauer anzubringen (Abb. 4 und 10), das bei Reparaturarbeiten leicht abgenommen werden kann.

An allen Schleusen ist das Unterhaupt gegen den Stoß eines vom Oberwasser einfahrenden Schiffes gesichert.

Auf der Nordstrecke sind dafür Balken angeordnet; ihr Arbeitsvermögen, d.h. ihre Widerstandsfähigkeit wurde aufgrund allgemeiner Erfahrungen von anfangs 10 Mp bis auf 78 Mp gesteigert. Die neuere Entwicklung des stark unterschrittenen Pontonbuges im

Binnenschiffbau macht jedoch die Wirksamkeit derartiger Schutzvorrichtungen zunichte; ein solcher Bug schiebt sich über den Balken und drückt ihn nach unten durch. Diesem Umstand wird auf der Südstrecke Rechnung getragen; dort werden nur noch Seile vorgesehen, die in Versuchen bewiesen haben, dass sie auch ein Schiff mit Pontonbug aufzuhalten vermögen.

Zur Beleuchtung im Nachtbetrieb sind im gesamten Schleusenbereich Natriumdampflampen angebracht (Abb. 3).

Die Schleusenanlagen erhalten 3 Pegel, einen im Oberkanal vor dem Oberhaupt, einen zweiten in Schleusenkammer-Mitte und einen dritten im Unterkanal, deren Anzeige auf elektrischem Wege im Schleusensteuerhaus auf Einfachlinienschreibern aufgezeichnet wird.

Neben diesen Schreibpegeln sind noch einfache Lattenpegel im Oberwasser, in der Kammer und im Unterwasser vorhanden (Abb.21).

Ein- und Ausfahrt werden durch optische Signalanlagen gesichert.

Am Oberhaupt und am Unterhaupt ist je eine Fernsehkamera (= Video-Kamera) aufgestellt; ihre Bildwiedergabegeräte (= Monitore) stehen im Schleusensteuerhaus zu beiden Seiten des Steuerpultes. Eine Anlage mit Lautsprechern entlang der Schleusenkammer und in den Vorhäfen vervollständigt die Ausrüstung der Schleuse.

Zusammenfassung

Der Main-Donau-Kanal überschreitet auf seinem Wege von Bamberg über Nürnberg nach Kelheim die europäische Hauptwasserscheide im Bereich des Fränkischen Jura.

Die Gesamtplanung seiner Stufenbauwerke war neben der Überwindung beträchtlicher Höhenunterschiede weitgehend durch den Wasserhaushalt des Kanals mitbestimmt worden, der als Mehrzweckunternehmen noch der Landeswasserwirtschaft dient.

Abgesehen von einigen Fluss-Schleusen herkömmlicher Bauart werden die Höhenstufen mit Sparschleusen ausgestattet, deren Konstruktion, auf bewährten Prinzipien aufbauend, die neuen Erkenntnisse des Schleusenbaues verwertet.

Der Nordabschnitt von Bamberg bis Nürnberg steht kurz vor der Vollendung.

Die bisherigen Bau- und Betriebserfahrungen an den fertig gestellten Schleusen bilden wertvolle Unterlagen für die Planung der Stufen des Südabschnittes zwischen Nürnberg und Kelheim, der mehrere Sparschleusen erhält, die zu den höchsten ihrer Art zählen.