

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Thema 2

Bauwerke zur Überwindung großer Fallhöhen

Abschnitt I und II:

Von Dipl.-Ing. Hans Georg Braun, Oberregierungsbaurat, Bundesverkehrsministerium Bonn; Dipl.-Ing. Johannes Illiger, Regierungsbaudirektor, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich; Dipl.-Ing. F. Köhler, Oberingenieur, Rhein-Main-Donau AG München; Dr.-Ing. Rudolf Kuhn, Rhein-Main-Donau AG München; Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinrich Wittmann, Professor, Technische Hochschule Karlsruhe

Abschnitt III:

Von Dr.-Ing. Arthur Röhnisch, Professor, Technische Hochschule Stuttgart

Themen des Berichtes:

- I. Neues Schiffshebewerk Henrichenburg in Waltrop
- II. Sparschleusen für große Fallhöhen des Kanals Bamberg-Nürnberg
- III. Weiterentwicklung der Rothmundschen Tauchschleuse

Zusammenfassung

I. NEUES SCHIFFSHEBEWERK HENRICHENBURG IN WALTROP

Der Bericht über das neue Schiffshebewerk Henrichenburg in Waltrop im Zuge des Dortmund-Ems-Kanals, das im Jahre 1962 dem Verkehr übergeben wurde, geht ein auf die Veranlassung für den Bau und behandelt die eingehenden Voruntersuchungen für die Wahl des Bauwerkes, die unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei den bisher ausgeführten und zur Diskussion gestellten Bauwerksformen zur Überwindung großer Fallhöhen durchgeführt wurden. Er befaßt sich mit den besonderen in Henrichenburg vorliegenden Verhältnissen und beschreibt das Bauwerk, das unter Beachtung der neuesten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Technik entworfen und ausgeführt wurde. Im Rahmen des Berichtes wird auf Konstruktionsteile, die für Bauwerke zur Überwindung großer Fallhöhen allgemein bekannt sind und angewandt werden, nicht eingegangen. Die bisherigen Betriebserfahrungen lassen es als berechtigt erscheinen, die gewählten Konstruktionsformen als Anregungen bei künftigen Entwürfen zu verwenden. Die Voruntersuchungen lassen aber auch erkennen, daß für die Wahl der Bauwerksform die örtlich vorliegenden Verhältnisse, die zu stellenden Forderungen und die jeweilige Preissituation auf dem Baumarkt von wesentlicher Bedeutung sind, so daß keine Hebewerksart anderen Systemen gegenüber als in jeder Hinsicht überlegen angesprochen werden kann.

II. SPARSCHLEUSEN FÜR GROSSE FALLHÖHEN DES KANALS BAMBERG-NÜRNBERG

Für die rd. 62 km lange Kanalstrecke Bamberg-Nürnberg mit einem Höhenunterschied von rd. 82 m sind 7 Stufen vorgesehen, von denen nur die Schleuse Buckenhofen im Flußlauf der Regnitz liegt und als Flußschleuse ausgebaut werden kann. Die übrigen 6 Schleusen befinden sich im Bereich des Stillwasserkanals. Sie verfügen nicht über die notwendigen Füllwassermengen. Es müssen aus wasserwirtschaftlichen Gründen Sparschleusen angewendet werden.

Das Füll- und Entleerungssystem sieht ein bis drei Sparbecken einseitig an den Schleusenammern vor, aus denen durch schräge Zubringerkanäle das Füllwasser unter die Sohle der Kammer geleitet wird, von wo es durch lotrechte Stichkanäle in die Kammer aufsteigt. Der Füllvorgang entnimmt den Sparbecken die über dem UW gelegenen Abschnitte der Kammerfüllung, der letzte Abschnitt, die Restfüllung, wird dem Oberwasser, d. i. der Kanalhaltung entnommen. Auf diese Weise werden bei drei Sparbecken 60 % der Füllwassermenge erspart. Sie gehen beim Entleerungsvorgang wieder zurück in die Sparbecken. Die Symmetrie der baulichen Anordnung und der hydraulischen Vorgänge läßt nur geringe Längskräfte für die Schiffe aufkommen.

Am hydraulischen Modell im Maßstab 1:25 wurden die Füllzeiten und die Verlustbeiwerte gemessen, wobei im Verlustbeiwert alle einzelnen Strömungsverluste enthalten sind. Die größte zugelassene Längskraft bestimmt die Hub- und Senkgeschwindigkeiten der Verschlüsse, wobei für den Längskanalverschluß entscheidend ist, daß weder der Entnahmesunk im oberen Vorhafen, noch der Füllschwall im unteren Vorhafen unzulässige Höhen und Neigungen der Wellenfront erreichen.

Fällt während des Betriebes ein Teilbecken aus, so wird die ganze Sparbecken-Gruppe stillgelegt. Das Volumen der ausgefallenen Sparbecken muß aus der oberen Haltung entnommen und der unteren Haltung zugegeben werden. Bei Ausfall eines Längskanalschützes wird die Füllung und Entleerung unsymmetrisch. Die zugelassene Längskraft wird um 100 % überschritten.

Das der oberen Haltung entnommene Füllwasser wird durch Pumpwasser aus der unteren Haltung ersetzt. Darüber hinaus steht bei dem großen Kanalquerschnitt und den großen Pumpenleistungen den Anliegern der Haltungen Brauchwasser für Landwirtschaft und Industrie zur Verfügung.

Für die Bauart der Verschlüsse wurden einfache und robuste Konstruktionen mit geringer Störanfälligkeit gewählt. Außerdem sollte bei allen Sparschleusen unabhängig von ihrer Hubhöhe eine möglichst einheitliche Ausführung aller Verschlüsse erreicht werden. Als Sparbeckenverschlüsse dienen Tiefschütze, die über einen öl-hydraulischen Antrieb geöffnet und geschlossen werden. Sämtliche Antriebsaggregate sind in einer auf einer Seite der Kammer verlaufenden Maschinenhalle eingebaut und daher jederzeit erreichbar. Auch die Längskanalverschlüsse werden als Tiefschütze ausgebildet (öl-hydraulischer Antrieb). Die Kammern werden im Oberhaupt durch ein Hubsenktor, im Unterhaupt durch ein Hubtor abgeschlossen. Auch in Ausnahmefällen soll die Kammer durch die Tore weder gefüllt, noch entleert werden. Die Steuerung sämtlicher Verschlüsse und Bewegungsvorgänge erfolgt zentral von dem am Unterhaupt gelegenen Steuerhaus. Außer der Automatik wird eine Hausteuerung für Notfälle eingebaut.

Die Konstruktion und Statik des Kammerquerschnittes war bedingt durch die hydraulischen Vorgänge und die schiffahrtsbetrieblichen, wasserwirtschaftlichen und maschinentechnischen Einrichtungen. Auf der Sparbeckenseite schied eine massive Kammermauer aus. Ihr Querschnitt wurde aufgelöst und als eingespannter geschlossener Rahmen ohne Fuge konstruiert. Das Kräftespiel ist im Gegensatz zur hinterfüllten landseitigen Kammermauer auf der Sparbeckenseite durch den einseitigen Wasserdruck bei gefüllter Kammer bestimmt.

III. WEITERENTWICKLUNG DER ROTHMUNDSCHEM TAUCHSCHLEUSE

Die Frage der technisch und wirtschaftlich günstigsten Gestaltung der Bauwerke zur Überwindung großer Höhenunterschiede in Binnenwasserstraßen ist seit mehr als 6 Jahrzehnten auf Internationalen Schiffahrtskongressen behandelt worden. Anhand der verschiedenartigen Schlußfolgerungen und Empfehlungen wird die historisch begrün-

dete Auffassung über die einzelnen Möglichkeiten zur Überwindung großer Fallhöhen dargelegt.

Es ist auffallend, daß die Anwendung des schwimmenden Troges als Gegengewicht bis auf die ersten Vorschläge von Welden und Rowley sowie die späteren Arbeiten von Rothmund keine Beachtung gefunden haben. Die Hauptursache ist darin zu suchen, daß die Baukunst s. Z. noch nicht die technische Entwicklung erreicht hatte, um derartige schwer zu übersehende Probleme zu lösen und ihre Ausführung durchzusetzen. Nach Auffassung des Verfassers sind die erforderlichen Voraussetzungen für die technische Verwirklichung der von Rothmund überzeugend begründeten Lösungen in der Gegenwart gegeben. Man sollte daher mit aller Tatkraft mindestens eine Klärung der zu lösenden Probleme versuchen. Diesem Zweck dient der vorliegende Beitrag.

Die wirtschaftliche Seite der Frage wurde bewußt nicht behandelt. Einmal war hierfür das zur Verfügung stehende Limit nicht ausreichend. Und zum anderen kann die Frage der Wirtschaftlichkeit nur durch einen echten Wettbewerb für ein bestimmtes Bauwerk beantwortet werden. Es wird aber die Meinung vertreten, daß die Tauchschleuse nach dem Prinzip der aerostatischen Waage insbesondere für hohe Gefälle in Frage kommt und hier am ehesten mit den bewährten Bauweisen in Konkurrenz treten kann.

Inhalt

	Seite
I. Neues Schiffshebewerk Henrichsburg in Waltrop	12
1. Veranlassung für den Bau eines dritten Abstiegsbauwerkes	12
2. Allgemeine Grundlagen für den Entwurf und Betrieb	13
3. Voruntersuchungen über die Art des Abstiegsbauwerkes	13
4. Das Bauwerk	15
4.1 Tiefbau	15
4.11 Allgemeines	15
4.12 Trogwanne	16
4.13 Schwimmerschächte	17
4.2 Stahlkonstruktion	18
4.3 Maschinenbau und elektrotechnische Anlagen	20
5. Durchführung des Betriebes	23
6. Leistung des Hebewerkes	23
II. Sparschleusen für große Fallhöhen des Kanals Bamberg-Nürnberg	25
1. Kammerfüllung und -entleerung	25
1.1 Das Füll- und Entleerungssystem	25
1.2 Der Füll- und Entleerungsvorgang	27
1.3 Hydraulik des Füllvorganges	28
1.4 Verlustbeiwert	29
1.5 Hub- und Senkgeschwindigkeiten der Verschlüsse	30
1.6 Sunk und Schwall in den Vorhäfen und in der Kanalstrecke	32
1.61 Entnahmesunk im oberen Vorhafen	32
1.62 Füllschwall im unteren Vorhafen	32

	Seite
2. Störfälle der Schleusenfüllung bzw. -entleerung	32
2.1 Ausfall von Sparbecken	33
2.2 Ausfall von einem Längskanalschütz am OH oder UH	33
3. Wasserwirtschaft der Kanalstrecke Bamberg-Nürnberg	33
3.1 Wasserwirtschaftliche Verhältnisse der Kanalstrecke	33
3.2 Wasserersparnis durch Sparbecken	34
3.3 Ersatz der Füllwassermenge durch Pumpwasser	34
4. Die Verschlüsse für die Füll- und Entleerungseinrichtungen	35
4.1 Sparbeckenverschlüsse	35
4.2 Längskanalverschlüsse	36
4.3 Haltungsabschlüsse	36
4.4 Steuerung des Füll- und Entleerungsvorganges	37
5. Konstruktion und Statik der Sparschleusen	37
5.1 Formgebung des Kammerquerschnittes	37
5.2 Statisches System des Kammerquerschnittes	38
5.3 Belastung der Kammermauern	42
III. Weiterentwicklung der Rothmundschen Tauschschleuse	42
1. Rückblick und Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten zur Überwindung großer Fallhöhen	42
2. Der Trog als Gegengewicht	44
2.1 Ältere Vorschläge und Ausführungen von Tauschschleusen	44
2.2 Die Rothmundsche Tauschschleuse	45
2.3 Einwendungen und Kritik	50
3. Neue Vorschläge für die Weiterentwicklung von Tauschschleusen	51
3.1 Luftzuführung	51
3.2 Antrieb und Führung	51
3.3 Sicherungsmaßnahmen in Katastrophenfällen	53

I. NEUES SCHIFFSHEBEWERK HENRICHENBURG IN WALTROP

1. Veranlassung für den Bau eines dritten Abstiegsbauwerkes

Der Dortmund-Ems-Kanal überwindet rd. 15 km nordwestlich von Dortmund bei Henrichenburg eine Geländestufe, die einen Wasserspiegelunterschied von rd. 14 m bedingt. Mit der Inbetriebnahme des Kanals im Jahre 1899 wurde an dieser Stelle das erste Schiffshebewerk mit Schwimmern (5 Schwimmer) in Deutschland für Schiffe mit einer Tragfähigkeit von 600—700 t dem Verkehr übergeben. Die Konstruktion dieses Bauwerkes ist in dem deutschen Bericht zum XIX. Internationalen Schiffahrtskongreß London 1957 beschrieben [4].

Die Forderung nach absoluter Betriebssicherheit für den Zugang zu der als Stichkanal ausgebauten Dortmunder Haltung gab Veranlassung, schon 1914 ein weiteres Abstiegsbauwerk als Sparschleuse in Betrieb zu nehmen. Maßgeblich für die Wahl einer Sparschleuse war mit die Befürchtung, daß ein Schiffshebewerk mit seinen umfangreichen maschinellen Einrichtungen den Anforderungen eines Dauerbetriebs nicht gewachsen

sein würde. Inzwischen hat die 63jährige, ohne ernstliche Störungen verlaufene Betriebszeit des alten Hebewerkes derartigen Bedenken jede Grundlage genommen.

Die Entwicklung des Verkehrs und die im Jahre 1928 getroffene Entscheidung, den Dortmund-Ems-Kanal für größere Schiffe auszubauen, machten es notwendig, die Planung für ein drittes Abstiegsbauwerk in Henrichenburg aufzunehmen. Nach einigen allgemeinen Voruntersuchungen, die im Kriege eingestellt werden mußten, wurden die Entwurfsarbeiten für das neue Abstiegsbauwerk im Jahre 1955 aufgenommen mit dem Ziel, zunächst das technisch und wirtschaftlich am besten geeignete System zu ermitteln.

2. Allgemeine Grundlagen für Entwurf und Betrieb

Die Abmessungen des neuen Abstiegsbauwerkes sind mit 90,0 m nutzbarer Länge, 12,0 m Breite und 3,0 m Wassertiefe im Trog auf das Europa-Schiff mit 1350 t Tragfähigkeit und 2,5 m Abladetiefe abgestimmt; sie lassen Schiffe mit 85,0 m Länge zu.

Der Wasserspiegelunterschied zwischen dem höchsten Ober- und dem niedrigsten Unterwasserstand beträgt 14,50 m, er ermäßigt sich bei normalen Wasserständen auf 13,75 m. Für den Betrieb sind kurzzeitig auftretende Wasserspiegelschwankungen in den angrenzenden Haltungen von + 0,25 m und -0,50 m zu berücksichtigen. Darüber hinaus mußte das Bauwerk vorsorglich für eine spätere Absenkung der oberen Haltung eingerichtet werden, die zum Ausgleich von Geländesenkungen infolge des Kohleabbaues erforderlich werden kann.

Nach den Forderungen des in unmittelbarer Nähe umgehenden Bergbaues muß das Bauwerk eine Schrägstellung aus der Senkrechten um 1 : 200 und eine Absenkung um 0,5 m aufnehmen können. Außerdem muß mit gewissen Zerrungen im Bereich des Bauwerkes gerechnet werden.

Für die Wahl des Systems war mit von wesentlicher Bedeutung, daß die oberhalb anschließende Dortmunder Haltung über keinerlei natürliche Zuflüsse verfügt. Das gesamte in dieser Kanalstrecke benötigte, also auch das für den Betrieb des Abstiegsbauwerkes erforderliche Wasser muß durch Pumpen aus der unteren Haltung zugeführt werden.

Im Baufeld steht unter einer 5—6 m starken, zum Fließen neigenden Schluff- und Feinsandschicht bis in eine Tiefe von rd. 600 m grauer Mergel an. Die Standfestigkeit des in der Struktur harten Mergels ist in den oberen Schichten durch wasserführende Klüfte und Risse beeinträchtigt.

3. Voruntersuchungen über die Art des Abstiegsbauwerkes

Voruntersuchungen sollten klären, welche Bauwerksart-Sparschleuse oder Hebewerk- und welches der verschiedenen Hebewerkssysteme unter den örtlich vorliegenden Verhältnissen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht die beste Eignung aufweist.

Aus diesem Grunde wurden zunächst in eingehenden Voruntersuchungen folgende Hebewerkssysteme gegenübergestellt:

1. Geneigte Ebene mit Längs- und Querförderung
2. Schwimmerhebewerk mit
 - a) lotrechten Schwimmern unter dem Trog (2, 4 und 5 Schwimmer)
 - b) liegendem Schwimmer unter dem Trog
 - c) 4 Schwimmern seitlich des Troges
3. Gegengewichtshebewerk.

Die Untersuchungen und Entwürfe für diese Bauwerke umfaßten den Stahl- und Maschinenbau sowie den Tiefbau; sie berücksichtigten die örtlichen Verhältnisse und gleiche Betriebsbedingungen als einheitliche Grundlage, weiterhin stellten sie die technischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme gegenüber. Die ermittelten Konstruktionsgewichte und Kosten der einzelnen Hebewerksarten sind — bezogen auf das Zweischwimmerhebewerk — in der folgenden Tabelle angegeben.

System	Konstruktionsgewicht Stahl- u. Masch.-Bau (ohne Gegengewichte)	Gesamtkosten (einschl. Tiefbau u. Gegengewichte)
Geneigte Ebene mit Längsförderung	147 %	149 %
Geneigte Ebene mit Querförderer	115 %	128 %
Zweischwimmerhebewerk	100 %	100 %
Vierschwimmerhebewerk	102 %	106 %
Fünfschwimmerhebewerk	105 %	108 %
Seitenschwimmerhebewerk	111 %	108 %
Flachschwimmerhebewerk	115 %	128 %
Gegengewichtshebewerk	121 %	112 %

Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen ist zu den verschiedenen Bauwerksgruppen an wesentlichen Gesichtspunkten zu bemerken, daß sich für die geneigten Ebenen die Forderung des Bergbaues nach einer Anpassung des Bauwerkes an ein stufenweise vermindertes Gefälle in Verbindung mit einer Absenkung der oberen Haltung bis zu 8 m in jeder Hinsicht zum Nachteil auswirkte. Die Schienenbahn für den Trogwagen mußte als absenkbar Stahlkonstruktion ausgebildet werden. Für die spätere Tieferlegung war die Bauwerksgrube erheblich größer auszuheben. Auch die Berücksichtigung der kurzzeitig auftretenden Wasserspiegelschwankungen bereitete Schwierigkeiten. Zudem stand der große Flächenbedarf einer solchen Anlage, besonders bei Anwendung der Längsförderung, der vom Bergbau erhobenen Forderung nach möglichst geringer Ausdehnung entgegen. Die geneigte Ebene mußte daher unter den vorliegenden Verhältnissen nicht nur wegen der höheren Kosten, sondern auch wegen der technischen Nachteile ausgeschieden werden. Aus den Untersuchungen ergab sich aber auch klar, daß eine geneigte Ebene unter günstigeren Geländeverhältnissen und normalen Betriebsvoraussetzungen durchaus für ein Hebewerk in Frage kommt.

Die örtlich bedingten Nachteile der geneigten Ebenen traten bei den Hebewerken mit senkrechter Förderung nicht auf. Die Änderung der Hubhöhe wirkte sich hier nur auf den oberen Haltungsabschluß aus, der in kurzer Zeit mit geringem Aufwand einer Absenkung der oberen Haltung und ihres Wasserspiegels angepaßt werden kann. Bei der Gruppe der Schwimmerhebewerke, bei denen die Schwimmer unter dem Trog angeordnet sind, weisen die über Tage liegenden Bauten nur geringe Unterschiede auf. Kostenänderungen ergaben sich hier vor allem bei den Schwimmern und den Schwimmerschächten. Da die Wandungsfläche der Schwimmer und der Schächte und das Volumen der Schächte mit der Anzahl der Schwimmer zunehmen — das Flachschwimmer-Hebewerk war durch die Größe der Schwimmergrube besonders ungünstig —, stellte sich das Zweischwimmerhebewerk als wirtschaftlichste Lösung heraus. Gegenüber den Schwimmerhebewerken lagen beim Seitenschwimmer- und beim Gegengewichtshebewerk die

Konstruktionsgewichte und damit die Kosten für den Stahlbauteil höher. Die Einsparungen im Tiefbau konnten diesen Nachteil nicht ausgleichen, da die Untergrundverhältnisse für die Erstellung des Tiefbauteiles' einschl. der Schwimmerschächte besonders günstige Voraussetzungen boten.

Zur Klärung der Frage „Schleuse oder Hebewerk“ wurden dann baureife Entwürfe für ein Zweischwimmerhebewerk und eine Sparschleuse ausgearbeitet.

Die Abmessungen des Troges und der Kammer waren gleich. Die Schleuse war zur Herabsetzung des Wasserverbrauchs mit 2×4 seitlichen Sparbecken versehen, zur Verkürzung der Schleusungszeit wurde für die Wasserzuführung in der Sohle der Kammer ein Grundlauf angeordnet. Beide Bauwerke wurden zur gleichen Zeit öffentlich ausgeschrieben, die aus den Angeboten ermittelten Baukosten waren zwar für die Schleuse niedriger als für das Hebewerk. Vergleichsrechnungen, bei denen der Kapitaldienst für die Anlagekosten und die laufenden Betriebskosten auf die Leistung der beiden Bauwerke bezogen wurden, ergaben aber eindeutig die wirtschaftliche Überlegenheit des Hebewerkes. Die Schleuse erwies sich auf Grund der höheren durch die Pumpkosten belasteten Betriebskosten und der im wesentlichen durch die längere Hubzeit bedingten geringeren Leistungsfähigkeit als unwirtschaftlicher, so daß schließlich das Zweischwimmerhebewerk für die Bauausführung bestimmt wurde. Das Ergebnis dieser Voruntersuchungen darf aber nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, da die besonderen Verhältnisse am Abstieg Henrichenburg das Ergebnis der Ermittlungen entscheidend beeinflussten.

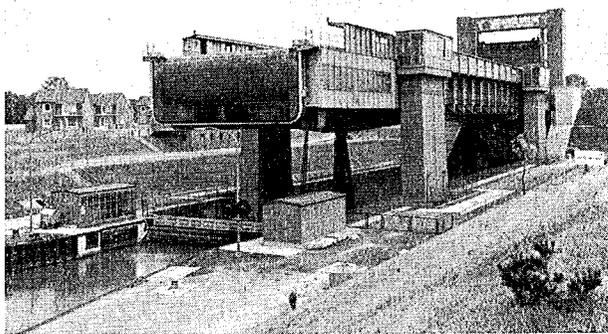


Bild 1

Ansicht des Schiffshebewerkes Henrichenburg in Waltrop

4. Das Bauwerk

4.1 Tiefbau

4.11 Allgemeines

Zum Tiefbauteil des Schiffshebewerkes gehören die Trogwanne, die den Trog in seiner unteren Lage aufnimmt und die das Fundament für die verschiedenen Stahlkonstruktionen bildet, und die beiden Schwimmerschächte. Die Trogwanne wird an den Enden durch den oberen und den unteren Haltungsabschluß begrenzt, die den Übergang zu den anschließenden Kanalhaltungen herstellen.

Für die Bauausführung des Tiefbauteils bestand die Möglichkeit, zunächst die Schwimmerschächte von der Geländeoberfläche aus abzuteufen und nach deren Fertig-

stellung die Baugrube für die Trogwanne — mit Abbruch der oberen Schachtteile — auszuheben und schließlich die Trogwanne selbst zu errichten (Bauausführung Schiffshebewerk Magdeburg-Rothensee). Vor allem aus Gründen der Zeitersparnis wurde einer anderen Lösung der Vorzug gegeben, bei der zuerst die Trogwanne hergestellt wurde und dann durch Aussparungen in der Trogwannensole hindurch die Schwimmerschächte abgeteufelt wurden, so daß beim Bau die verschiedenen Arbeitsvorgänge ineinander übergehen konnten. Bei diesem Verfahren war auch als Vorteil zu werten, daß auf das in den oberen Fließsandschichten besonders schwierige Abteufen eines Vorschachtes verzichtet und die Trogwanne als Fundament für das Fördergerüst der Schächte verwendet werden konnte.

4.12 Trogwanne

Die Trogwanne ist gegen das Grundwasser abgedichtet und durch das Gewicht der Einzelteile auftriebsicher ausgebildet. Sie besteht aus einzelnen Stahlbetonblöcken, die nach statischen und konstruktiven Gesichtspunkten durch Längs- und Quertrennfugen unterteilt sind. Zur Dichtung sind Fugenbänder aus Kunststoff in zwei Lagen eingebaut; durch Querverbindungen ist die Fugendichtung in einzelne Schotte abgeteilt, um eine erhöhte Sicherheit gegen Wasserdurchtritt zu erreichen. Entsprechend den statischen Bedürfnissen sind die Fugen teilweise als Preßfugen und teilweise als Raumfugen mit einer im allgemeinen 10 mm starken Kunststoffzwischenlage ausgeführt.

Der tiefbauliche Teil des oberen Haltungsabschlusses mit einer Höhe von 24,25 m besteht aus einem im Querschnitt U-förmigen Stahlbetonrahmen, dessen waagerechter Riegel durch den tieferen Mittelteil und dessen senkrechte Stiele durch die Seitenblöcke gebildet werden. Dieser Halbrahmen, der für den Erd- und Wasserdruck der oberen — mit dem Wasserspiegel rd. 20 m über der Trogwannensole liegenden Kanalhaltung zu bemessen war, stützt sich an den beiden Seitenblöcken durch je eine nach Unterwasser gerichtete Flügelwand auf einen Sohlblock der Trogwanne ab. Die Oberseite des Mittelteiles dient als Auflager für den 7,0 m hohen Drempe, der aus je 1,0 m hohen Stahlbetonschwellen besteht und bei der Absenkung des Wasserspiegels der oberen Haltung abschnittsweise vertieft werden kann. An der Vorderseite des Schwellenstapels und der Seitenblöcke ist die Stahlkonstruktion für den Anschlag des Spaltdichtungsrahmens als Dichtungsschürze angebracht. Um eine innige Verbindung der fest in den Haltungsabschluß einzubauenden Stahlteile wie Torführungen, Dichtungsanschlüsse, Kantenschutz- und Notverschlußarmierungen mit dem Beton zu erhalten und eine einwandfreie Dichtigkeit zu erzielen, wurden diese Teile vor dem Betonieren unter Verwendung eines besonderen Stützgerüsts montiert. Auf den Innenseiten der beiden Flügelwände sind Spaltwasserfallschächte ausgespart, in die das beim Betrieb am oberen Haltungsabschluß anfallende Spaltwasser eingeleitet und über seitlich der Trogwanne angeordnete Leitungen dem Vorhafen zugeführt wird.

Im Bereich der Schwimmerschächte besteht die Trogwanne aus den in Form einer Winkelstützmauer ausgebildeten Führungsgerüstfundamenten. Diese umschließen mit ihrem unteren, horizontalen Teil die Schwimmerschächte und stützen sich in der Längsachse des Bauwerks in einer Preßfuge gegeneinander ab. In diese Teile sind zur Verankerung der Führungsgerüstlager schwere Fachwerkträger einbetoniert, die die in den Katastrophenfällen in den Führungsgerüsten auftretenden großen Kräfte in das Fundament übertragen.

In dem übrigen Teil zwischen den Haltungsabschlüssen setzt sich der Querschnitt der Trogwanne aus einem Mittelblock in der Sohle und zwei seitlichen winkelförmigen Teilen zusammen.

Der tiefbauliche Teil des unteren Haltungsabschlusses besteht aus einer Sohlplatte und den beiden mit dieser biegesteif verbundenen Seitenblöcken. Für den Antrieb und die Lager des Haltungstores, für elektrische Schalt- und Verteileranlagen und für die Unterbringung der Heiztransformatoren sind im Beton der Seitenblöcke Kammern ausgespart, über denen Antriebshäuser errichtet sind. Auf der dem Trog zugewandten Seite des unteren Haltungsabschlusses ist die Dichtungsschürze der Trogdichtung eingebaut. Sämtliche festen Stahlbauteile sind auch am unteren Haltungsabschluß mit Hilfe eines Stützgerüsts vormontiert und unmittelbar einbetoniert worden.

In der Trogwanne befindet sich vor dem unteren Haltungsabschluß ein Sammelraum für das beim Öffnen der Trogdichtung abstürzende Spaltwasser; in seitlichen Schächten eingebaute Pumpen fördern dieses Wasser in den unteren Vorhafen. Im Beton der Trogwanne sind zahlreiche Schächte, Rohrleitungen und Kanäle für die Entwässerung und die Unterbringung von Pumpen, Kabel und Pegel angeordnet. Die Schwimmerschächte sind durch einen Überlauf an das Entwässerungssystem angeschlossen. In der Mitte der Trogwannensole ist ein Tunnel für die Gleichlaufwelle der vier Antriebsspindeln eingelassen.

4.13 Schwimmerschächte

Die Beschaffenheit des Untergrundes bot für den Bau der Schwimmerschächte sehr günstige Voraussetzungen, da die Standfestigkeit des Mergels die Anwendung aufwendiger Spezialverfahren (Gefrierverfahren, Einbau von Tübbingen o. ä.) entbehrlich machte. Der in den oberen Mergelschichten auf Grund der Klüftigkeit zu erwartende Wasserzutritt konnte durch eine Verpressung des Untergrundes mittels Zementinjektionen, die vor dem Aushub der Baugrube für die Trogwanne von der Geländeoberfläche aus vorgenommen wurden, weitgehend herabgesetzt werden.

In Anlehnung an die Schachtbaumethoden des Bergbaues im benachbarten Ruhrgebiet wurden die 52,48 m tiefen Schwimmerschächte mit einem Ausbruchdurchmesser von 13,80 m abgeteuft. Jeweils nach rd. 1,80 m Teufe wurde ein Mauerwerksring aus Klinkern mit 0,52 m Stärke eingebaut; der beim weiteren Abteufen zunächst unterfahren und nach Erreichen der nächsten Abteufstufe durch einen weiteren Ring ergänzt wurde. Der Mauerwerkszylinder hatte beim Bau die Aufgabe, einen Einbruch des Gebirges zu verhindern und die einwandfreie Ausführung eines gegen den Wasserdruck statisch wirksamen Stahlbetoninnenzylinders mit einem lichten Durchmesser von 11,32 m zu ermöglichen. Auf ein Lösen des Mergels mittels Sprengungen mußte verzichtet werden, nachdem bei Versuchssprengungen hohe, für die über den Schwimmerschächten bereits vorhandene Trogwanne gefährliche Schwinggeschwindigkeiten festgestellt worden waren. Zur Steigerung der Abteufleistung wurde mit gutem Erfolg ein dieselhydraulischer Bagger auf der Schachtsohle eingesetzt, der mit einem für das Aufreißen des Gesteins besonders geeigneten Tieflöffel ausgerüstet war. Die Schwimmerschächte des Schiffshebewerkes sind normalerweise mit Wasser gefüllt. Da aber für die Montage und die spätere Überprüfung der Schwimmer die Entleerung möglich sein muß, waren die Sohle und der Stahlbetoninnenzylinder für den äußeren Wasserdruck zu bemessen und die Auftriebskräfte in das Gebirge abzuleiten. Zur Berücksichtigung der schwer erfassbaren Einflüsse des Gebirges wurde für die Bemessung des Schachtausbaues der statische Wasserdruck um 30% erhöht. Die Schachtsohle wurde als Kreisplatte in Stahlbeton mit einer Stärke von 2,3 m in der Mitte und 1,5 m am Rand ausgeführt und der Schacht durch einen Stahlbetonzylinder ausgekleidet. Beide Teile sind biegesteif miteinander verbunden; mit Rücksicht auf die hohen statischen Beanspruchungen an der Übergangsstelle ist der Zylinder, der leicht bewehrt ist und eine Stärke von 0,45 m besitzt, auf den unteren 3,0 m konisch verstärkt. Die Schachtsohle gibt die Auftriebskräfte an den Stahlbetonzylinder und über den auskragenden Rand an das Gebirge ab. Der Zylinder wurde im unteren Teil unmittelbar

gegen das Äußere, zur Übertragung der Auftriebskräfte hier verzahnt ausgeführte Klinkermauerwerk betoniert.

In dem nach oben anschließenden zylindrischen Teil des Schachtes wurde mit Rücksicht auf das zwar nur in geringer Menge, aber unter Druck austretende Gebirgswasser von einem Betonieren gegen das äußere Mauerwerk abgesehen. Der Stahlbetoninnenzylinder wurde freistehend mit doppelter Gleitschalung hergestellt. In der Fuge von 0,25 m Weite zwischen dem äußeren Mauerwerk und dem Stahlbetonzylinder konnte das aus dem Mauerwerk austretende Wasser ohne Störung des Betoniervorganges abgeführt werden. Die Fuge wurde während des kontinuierlich mit einer Steiggeschwindigkeit von rd. 4,0 m/Tag verlaufenden Betoniervorganges mit Grobkies verfüllt und zum Abschluß mit Zement verpreßt. Der im Bereich der Trogwanne liegende Abschnitt des Schachtausbaues wurde in einfacher Gleitschalung hergestellt und unter Einfügung einer Raumfuge von 20 mm gegen die Wandfläche der Trogwannensole betoniert.

Im inneren Schachtzylinder wurden keine Fugen angeordnet. Die unvermeidbaren Arbeitsfugen für den Ansatz der Gleitschalungen wurden durch einfache Fugenbänder zusätzlich gedichtet. Die Bewehrung wurde an diesen Stellen durchgeführt. Ein Einfluß des Schwindens konnte auf Grund der günstigen örtlichen Verhältnisse innerhalb des Gebirges vernachlässigt werden. Der Wasserzutritt in den leeren Schacht hat die im Bauvertrage zugelassene Menge von 5 l/Min nicht erreicht.

4.2 Stahlkonstruktion

Der Bemessung der Stahlkonstruktionen wurden nicht Beanspruchungen des normalen Betriebes, bei dem sich infolge des Ausgleiches zwischen dem Gewicht des beweglichen Teiles und dem Auftriebsvermögen der Schwimmer der bewegliche Teil im Schwebestand befindet, sondern mögliche Katastrophenfälle zugrunde gelegt. Anomale Beanspruchungen können durch Leerlauf des Troges sowie durch Verlust des Auftriebes infolge Vollaufen schadhafter Schwimmer auftreten. Neben diesen beiden Katastrophenfällen wurden noch eine Reihe weiterer außergewöhnlicher Belastungsfälle berücksichtigt, denen jedoch nur eine geringere Bedeutung zukommt. Zur Bemessung der Konstruktionsteile wurden die sich aus den verschiedenen Belastungsfällen ergebenden Beanspruchungen zu den ungünstigen Werten kombiniert. Die Windkräfte wurden bei Bewegung des Troges für die Windangriffsfläche des Troges zuzüglich einem 4 m breiten Verkehrsband über dem Normalwasserspiegel mit 50 kg/m^2 und bei Stillstand des Troges mit 125 kg/m^2 angenommen. Die zulässigen Stahlbeanspruchungen wurden für die Katastrophenbeanspruchungen gegenüber den allgemein gültigen Vorschriften „Berechnungsgrundlagen für Stahlwasserbauten“ erhöht auf $\sigma_{\text{zul}} = 2100 \text{ kg/cm}^2$, $\tau = 1,21 \text{ t/cm}^2$ bei St 37 und $\sigma_{\text{zul}} = 3200 \text{ kg/cm}^2$, $\tau = 1,85 \text{ t/cm}^2$ bei St 52.

Der bewegliche Teil des Hebewerkes hat ein Gesamtgewicht von rd. 5000 t, das sich aus dem Konstruktionsgewicht von rd. 1500 t und einer Wasserlast im Trog von rd. 3500 t ergibt. Er besteht aus dem Trog mit den Segmenttoren an den Trogenden und den Spaltdichtungsrahmen zum Anschluß des Troges an die Haltungsabschlüsse sowie den beiden Schwimmern mit den Tragkörpern, die die Verbindung zwischen den Schwimmern und dem Trog herstellen.

Die festen Teile bestehen aus den vier Führungsgerüsten, die alle auf den beweglichen Teil wirkenden Kräfte aufnehmen und in die Gründung abführen sowie den Haltungsabschlüssen mit einem Hubtor auf der Oberwasserseite und einem Segmenttor auf der Unterwasserseite. Auf die Stahlkonstruktion der Haltungsabschlüsse wird hier nicht eingegangen, da sie keine von den üblichen Stahlwasserbaukonstruktionen wesentlich abweichende Ausführung erforderte.

Die Schwimmer mit den Tragkörpern bilden eine starr verbundene Einheit, die mit den Querträgern des Troges durch ein Punktkipplager für eine mögliche Normallast von rd. 2200 t verbunden sind und durch drei um 120° versetzte Rollen in einer Ebene am oberen Ende der Schwimmer in den Schwimmerschächten geführt werden. Diese Form der Führung mußte mit Rücksicht auf die Möglichkeit von Schiefstellungen des Bauwerkes gewählt werden.

Zur Erzielung einer möglichst leichten Konstruktion für die Schwimmer wurde der erstmalig bei dem Hebewerk Magdeburg — Rothensee angewandte Gedanke ausgenutzt, im Inneren der Schwimmer dauernd einen erhöhten Luftdruck zu halten, der im normalen Betrieb dem äußeren Wasserdruck entgegenwirkt. Bei den in zwei Zellen aufgeteilten Schwimmern beträgt der Druck in der unteren Zelle 4 atü und in der oberen Zelle 3 atü. Im Betriebsfall wirkt auf die Schwimmer, die einen Durchmesser von 10 m und eine Höhe von 35 m haben, in ihrer tiefsten Stellung nur ein Bodendruck von 1 kg/cm^2 .

Zum Ausgleich des Wuchses an Auftriebsvermögen beim Eintauchen der Tragkörper in das Wasser ist in der unteren Zelle ein nach unten offener Ausgleichszylinder angeordnet, der bei der oberen Schwimmstellung mit Luft gefüllt ist. Beim Absinken der Schwimmer verringert sich mit zunehmendem Wasserdruck das Luftvolumen des Ausgleichszylinders. Der Schwund des Auftriebsvermögens an dieser Stelle wird ausgeglichen durch den Gewichtsverlust des Tragkörpers beim Eintauchen in Wasser.

Ein Gedanke an Stelle von Schwimmern, Taucherglocken zu verwenden, mußte mit Rücksicht auf thermodynamische Schwierigkeiten fallengelassen werden. Auch von verschiedenen anderen Sonderkonstruktionen wurde abgesehen, da die möglichen Kostenersparnisse für das Gesamtobjekt in keinem Verhältnis zu den erhöhten Risiken beim Betrieb standen.

Der Druck in den Schwimmern wird laufend überwacht. Bei einem Druckabfall wird automatisch der Sollluftdruck wiederhergestellt. Zur Verringerung der Korrosionsmöglichkeit in den Schwimmern wird die eingebrachte Luft getrocknet. Die Schwimmer und Tragkörper sind als Schweißkonstruktion aus St. 37 ausgeführt. Die Blechstärken der Außenhaut der Schwimmer schwanken zwischen 15 und 22 mm. An den Stellen, an denen Kräfte aus den Zellenböden in die Außenhaut überführt werden, erhöht sich die Blechstärke bis zu 45 mm.

Der Trog hat eine Gesamtlänge von 93 m. Zu beiden Seiten des Troges ist ein Bedienungssteg angeordnet, der zum Schutz des Bedienungspersonals gegen Witterungseinflüsse mit einem Schutzdach versehen ist. Seitlich der Trogwanne befinden sich Maschinenräume, in denen u. a. die Antriebe für die Trogtore und Spaltdichtungsrahmen, Kompressoranlagen einschließlich Lufttrocknungsanlage für die Versorgung der Schwimmer mit Luft, eine Treidelwinde und Pumpen zum Schmieren der Spindelmuttern untergebracht sind. Die Trogseitenwände sind gegen Schiffsstöße durch Scheuerleisten aus Spundwandprofilen geschützt. Die Segmenttore an den Trogenden sind ebenfalls mit einem Stoßschutz versehen.

Das statische System der Trogwanne entspricht einem Träger auf zwei Stützen mit überkragenden Enden, bei dem die Feldweite entsprechend dem Abstand der beiden Schwimmerachsen 53,0 m beträgt. Der Trog stellt eine Verbundkonstruktion dar. Die Trogseitenwände sind Stege der Hauptträger, deren Obergurt aus einem Lamellenpaket und deren Untergurt aus der im Trogboden mitwirkenden Plattenbreite gebildet wird. Der Trogquerschnitt besteht aus einer längs- und querversteiften U-förmigen Konstruktion. Die normale Längsaussteifung ist auf der Trogaußenseite in Form von Längssteifen angebracht. Zur Aussteifung der Konstruktion gegen Torsionsbeanspruchungen beim Auftreten von Horizontalbelastungen ist unter der Trogmitte ein Torsionskasten aus-

geführt. Der Queraussteifung dienen Querträger, im Abstand von mindestens 3,7 m. An den Trogenden sind zur Aussteifung noch Torsionsquerrahmen angeordnet. In den Schwimmerachsen befinden sich die beiden Hauptquerträger, die sämtliche auf den beweglichen Teil einwirkenden Kräfte auf die Führungsgerüste übertragen. Vertikalkräfte werden durch die Spindelmuttern in die Spindeln, Horizontalkräfte in Längsrichtung durch gefederte Rollen auf zwei Führungsgerüste und in Querrichtung durch festgelagerte und gefederte Rollen auf alle vier Gerüste übertragen. Die Blechstärken der Trogwanne schwanken zwischen 10 und 28 mm. An dem Übergang von den Tragkörpern auf die Querträger ergeben sich Stärken bis zu 40 mm. Zur Überführung der Kräfte an den Querträgerenden in die Spindelmuttern mußten Stahlgußkonstruktionen gewählt werden. Der Trog wurde mit Ausnahme der Querträgerstöße in den aufgehenden Seitenteilen des Troges, die mit hochzugfesten Schrauben verschraubt sind, verschweißt. Der Anschluß der Hauptquerträgerenden wurde aus Montagegründen als Nietstoß ausgebildet.

Die Führungsgerüste sind Vollwandkonstruktionen, aus zwei torsionssteifen auf der Rückseite durch eine Scheibe verbundenen Kästen, die oben und unten an einem kastenförmigen Querriegel angeschlossen sind. Auf den Führungsgerüsten stehen die Spindelantriebe in geschlossenen Aufbauten. Die Spindeln sind zwischen den torsionssteifen Kästen angeordnet, sie lagern in den Querriegeln. In einem der Seitenkästen jedes Führungsgerüsts ist zur Erleichterung der Wartung der maschinellen Anlagen ein Aufzug angeordnet. Mit Rücksicht auf die Möglichkeit von Schiefstellungen durch bergbauliche Einflüsse sind die Gerüste an drei Punkten so gelagert, daß sie nachgerichtet werden können. Bei der Bemessung der Führungsgerüste wurde Wert auf eine steife Konstruktion gelegt, um Bewegungen des Troges infolge Durchbiegung der Gerüste möglichst zu vermeiden, wenn dadurch auch die zulässigen Spannungen an vielen Stellen bei weitem nicht ausgenutzt wurden. Die in den Werkstätten hergestellten Teile sind verschweißt, die Baustellenstöße genietet.

Die Auswirkung der Anwendung neuerer Konstruktionsgrundsätze auf das Gewicht der Stahlkonstruktion ergibt sich aus der nachstehenden Tabelle.

	Henrichen- burg alt	Magdeburg Rothensee	Henrichen- burg neu
Inbetriebnahme	1899	1938	1962
Schiffsgröße	700 t	1 000 t	1 350 t
Gewicht des beweglichen Teiles = Schwimmerauftrieb	3 100 t	5 000 t	5 000 t
Gewicht der Wasserfüllung des Troges	1 550 t	2 650 t	3 500 t
Gewicht der Stahlkonstruktion des beweglichen Teiles	1 550 t	2 350 t	1 500 t
<u>Gewicht Stahlkonstruktion</u> <u>Gewicht Wasserfüllung</u>	1,0	0,89	0,43

4.3 Maschinenbau und elektrotechnische Anlagen

Der Antrieb ist so bemessen, daß die Fahrzeit für einen Troghub von 14,5 m rd. 120 sec dauert. Nach 15 sec Anfahrzeit erreicht der Trog eine Fahrgeschwindigkeit von 15 cm/sec, sie liegt rd. 26 % über der Geschwindigkeit der Trogfahrt am alten Hebewerk Henrichenburg. Das Stillsetzen des Troges erfolgt wieder in 15 Sekunden. Bei vollkommenem

Ausgleich zwischen dem Gewicht des beweglichen Teiles und dem Auftriebsvermögen der beiden Schwimmer hat der Trog-Antrieb lediglich Kräfte zu überwinden, die sich aus der Reibung einschließlich Berücksichtigung der Horizontalkraft aus Winddruck und der Beschleunigung der Trogbewegung ergeben. Da ein vollkommener Ausgleich zwischen Gewicht und Auftrieb infolge Schwankungen des Wasserspiegels beim Betrieb praktisch nie vorhanden ist, sind die Motore so bemessen, daß sie Wasserspiegelschwankungen von ± 10 cm gegenüber dem Sollwert von 3,0 m im Trog, die einer Last von rd. ± 110 t entsprechen, ohne Beeinträchtigung der Bewegungsgeschwindigkeit zulassen.

Antriebsschema für den Trog

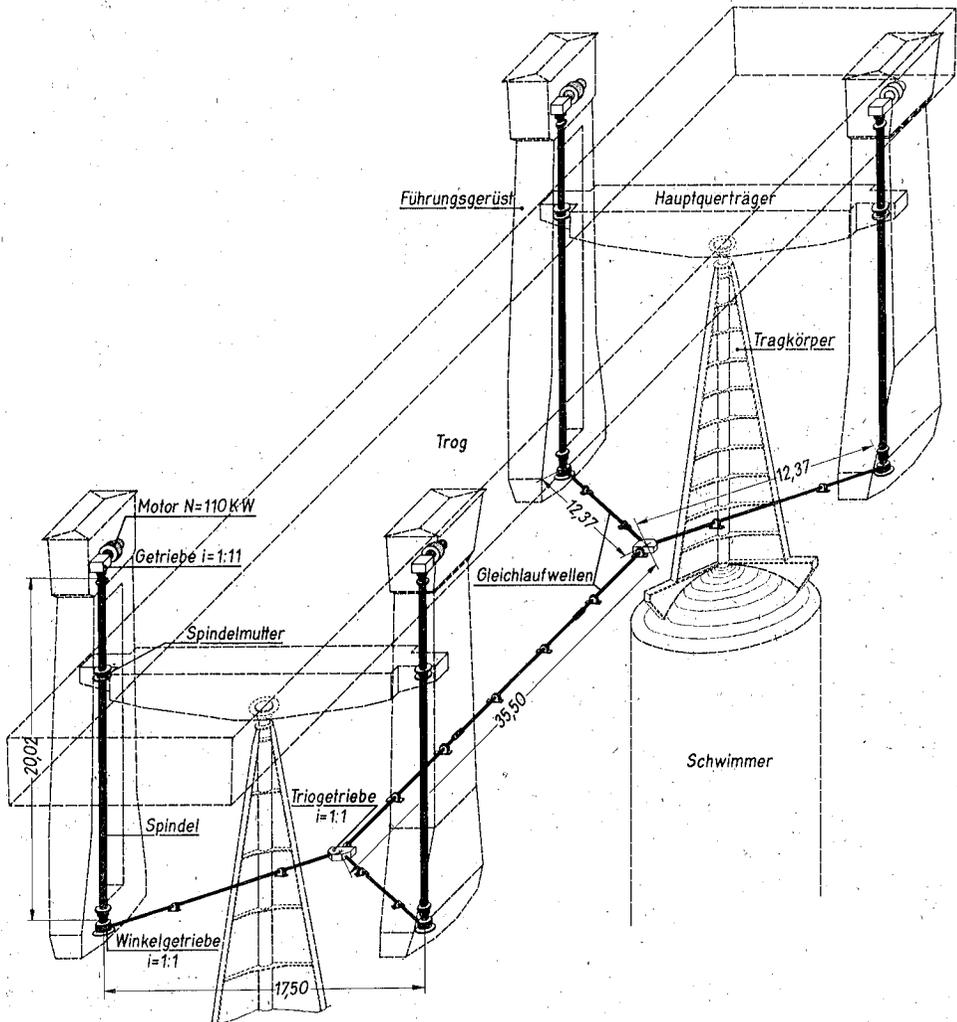


Bild 2
Antriebsschema

Während des Trogstillstandes auftretende Wasserspiegelschwankungen von mehr als ± 10 cm im Trog werden durch automatisch arbeitende Pumpen in den Haltungstoren ausgeglichen.

Durch eine in der Trogwanne verlegte mechanische Gleichlaufwelle, die die vier Spindeln miteinander verbindet, werden die Spindeln gezwungen, eine gleiche Drehzahl einzuhalten, so daß Schiefstellungen des Troges infolge unterschiedlicher Umdrehungszahl der Spindeln ausgeschlossen werden. Beim Ausfall eines Motors sind die drei übrigen Motore in der Lage, über die Gleichlaufwelle die vierte Spindel mit anzutreiben. Die durch Gleichstrom angetriebenen Motore haben eine Leistung von 110 KW bei einer Umdrehungszahl von $n = 750$ U/Min. Für die Bemessung der Gleichlaufwelle wurde die Möglichkeit des Auftretens von Schwingungen eingehend überprüft.

Zur Erzeugung des Gleichstromes, die bei älteren Hebewerken durch Leonhard-Umformer erfolgt, dienen zwei Quecksilberdampfstromrichter. Die Gleichrichtergefäße, und zwar je Stromrichter 6 Stück, sind als Einanodengefäße ausgeführt. Die Regelung der Drehzahl und der Drehmomente erfolgt elektronisch.

Die Verzögerung der Trogeschwindigkeit zum Stillsetzen des Troges erfolgt automatisch unter Berücksichtigung des jeweiligen Wasserstandes in der angefahrenen Haltung. Die Wasserstände in der angesteuerten Haltung werden durch ein Meßverfahren laufend erfaßt und mit der jeweiligen Höhenlage des Wasserspiegels im Trog während der Fahrt verglichen. Die aus den digitalen Messungen errechneten Wasserspiegeldifferenzen werden in die Steuerungs- und Regeleinrichtungen des Trogantriebes weitergegeben, die den Beginn der Abbremsung der Trogfahrt bestimmen. Die Bremsstrecke vom Beginn der Abbremsung bis zum Stillstand des Troges beträgt beim normalen Betrieb 1,12 m.

Die vier rd. 20 m langen Spindeln haben ein dreigängiges nichtselbsthemmendes Gewinde. Die Lagerung der Spindeln auf axialen Pendelrollenlagern läßt ohne Rücksicht auf die Bewegungsrichtung des Troges nur Zugbeanspruchungen auftreten. Die Umdrehungszahl beträgt $n = 68$ U/Min. Die Bemessungen der Spindeln erfolgte für den ungünstigsten Katastrophenfall „Vollauf der Schwimmer“ und damit Wegfall des gesamten Auftriebes, so daß das Gesamtgewicht des beweglichen Teils von den Spindeln getragen werden muß. Während beim Normalbetrieb die vertikale Belastung rd. 39 t beträgt, erhöht sie sich im Katastrophenfall auf rd. 1250 t. Horizontalbelastungen der Spindeln aus Wasserdruck, Wind und Temperatur werden durch die Trogführungen ausgeschaltet.

Die Verbindung zwischen den Spindeln und dem Trog wird durch die in den beiden Hauptquerträgern des Troges angeordneten Spindelmuttern hergestellt. Die beweglich gelagerten Muttern bestehen aus einem Stahlgußgehäuse mit einem auswechselbaren zweiteiligen Futter aus Bronze. Die Werkstoffe der Spindeln und Bronzefutter müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß lediglich das Bronzefutter einem Verschleiß unterworfen ist. Zur Einhaltung dieser Forderung spielte die Auswahl eines geeigneten Schmiermittels und die einwandfreie Zuführung und Verteilung des Schmiermittels eine ausschlaggebende Rolle. Nach den Erfahrungen am alten Hebewerk und an dem Hebewerk Magdeburg-Rothensee ist damit zu rechnen, daß die Bronzefutter jeweils mehrere Jahre halten.

Die Spaltdichtungsrahmen, die zur Überbrückung des rd. 100 mm breiten Spaltes zwischen dem Trog und den Haltungsabschlüssen dienen, werden hydraulisch angetrieben. Die am Trog beweglich aufgehängten U-förmig ausgebildeten und mit dem Trog durch eine Gummidichtung verbundenen Rahmen werden nach dem Stillsetzen des Troges durch Pressen gegen die Dichtungsschürze des Haltungsabschlusses gedrückt und vor Beginn einer Trogfahrt wieder abgezogen.

Die Empfindlichkeit eines Hebewerkes gegen Frost machte es notwendig, in großem Umfange Heizelemente einzubauen, die eine Eisbildung verhindern. Der Umfang der Flächenheizung allein beträgt rd. 100 m². Die verschiedenen Heizelemente sind so ausgelegt, daß das Hebewerk betriebsfähig bleibt, bis auf der freien Kanalstrecke die Eisbildung zu einer Eissperre führt. Die Beheizung der Anschläge der Haltungstore, und der Trogtore erfolgt durch Widerstandsheizungen, die aus mit Silikongummi isolierten Flacheisen bestehen und mit den Anschlagskonstruktionen einbetoniert oder an der Stahlkonstruktion des Troges befestigt sind. Die Dichtungsschürzen an den Haltungsabschlüssen werden durch eine Widerstandsheizung aus einem System verzinkter Rohre hinter den remanitplattierten Andichtflächen erwärmt. Die Erwärmung der 3phasig aufgeteilten Anlage erfolgt durch Drehstrom. Die Gummidichtungen der Spaltdichtungsrahmen, frostgefährdete Schieber und Getriebe werden mit Strahlungsheizungen aufgewärmt, die soweit zweckmäßig, aus Heizkabeln bestehen.

5. Durchführung des Betriebes

Die Bedienung und Steuerung des gesamten Betriebes erfolgt durch einen Trogfürer von zwei Steuerständen aus, die an den beiden Trogenden auf einem Laufsteg des Troges angeordnet sind. In jedem Steuerstand befindet sich ein Steuerpult und eine Steuertafel. Von dem Steuerpult aus werden die an dem jeweiligen Trogende und auf dem dazugehörigen Haltungsabschluß befindlichen Antriebe für das Haltungstor einschließlich der im Haltungstor eingebauten Pumpanlage, das Trogtor und der Spaltdichtungsrahmen bedient. Die Reihenfolge der einzelnen auf den Steuerpulten von Hand auszulösenden Arbeitsvorgänge sind durch eine automatische Folgeschaltung und durch Steuerorgane so geregelt, daß die Einleitung von falschen Bewegungen nicht möglich ist. Die Steuerung der Trogfahrt erfolgt von der Steuertafel aus. Neben den Schalteinrichtungen sind in den Steuerständen Kontrollgeräte untergebracht, die eine Überwachung aller für den Betrieb wesentlichen elektrischen und maschinellen Anlagen ermöglichen.

6. Leistung des Hebewerkes

Bei Betrachtung der Jahresleistung des neuen Hebewerkes ist von der Dauer eines Hubvorganges auszugehen, die 34 Minuten beträgt. Ein Hubvorgang umfaßt den Zeitaufwand für die Einfahrt eines 1350 t Schiffes oder mehrerer kleinerer Schiffe, Hub des Troges, Ausfahrt der Schiffe, Einfahrt der Schiffe in Gegenrichtung, senken des Troges und Ausfahrt der Schiffe. Unter Berücksichtigung eines normalen 16stündigen Betriebes ergeben sich je Tag rd. 28 Hubvorgänge. Werden für die Ermittlung der Jahresleistung 92 betriebsfreie Tage (64 Sonn- und Feiertage und 28 Tage infolge Frostsperre oder für Instandsetzungen) gerechnet, so ergeben sich rd. 7500 Hubvorgänge oder bei einer vollen Ausnutzung eines Troges in jeder Richtung mit Schiffen mit einer Tragfähigkeit von 1350 t rd. 20,75 Mio Tragfähigkeitstonnen. Diese Zahl kann sich erhöhen bei einem längeren Tagesbetrieb und bei einem Betrieb an Sonn- und Feiertagen.

Infolge ungleichmäßiger Ausnutzung des Troges durch Schiffe unterschiedlicher Größe und Ungleichmäßigkeit des Verkehrs wird die vorermittelte Leistung kaum erreicht. Für die bei Henrichenburg vorliegenden Verhältnisse wird am neuen Schiffshebewerk zunächst nur mit einer Jahresleistung von rd. 15 Mio Tragfähigkeitstonnen gerechnet, einer Leistung, die die Leistung einer Sparschleuse gleicher Abmessung selbst bei Steiggeschwindigkeiten in der Schleuse bis zu 4 m/Min. um mindestens 30 % übersteigt.

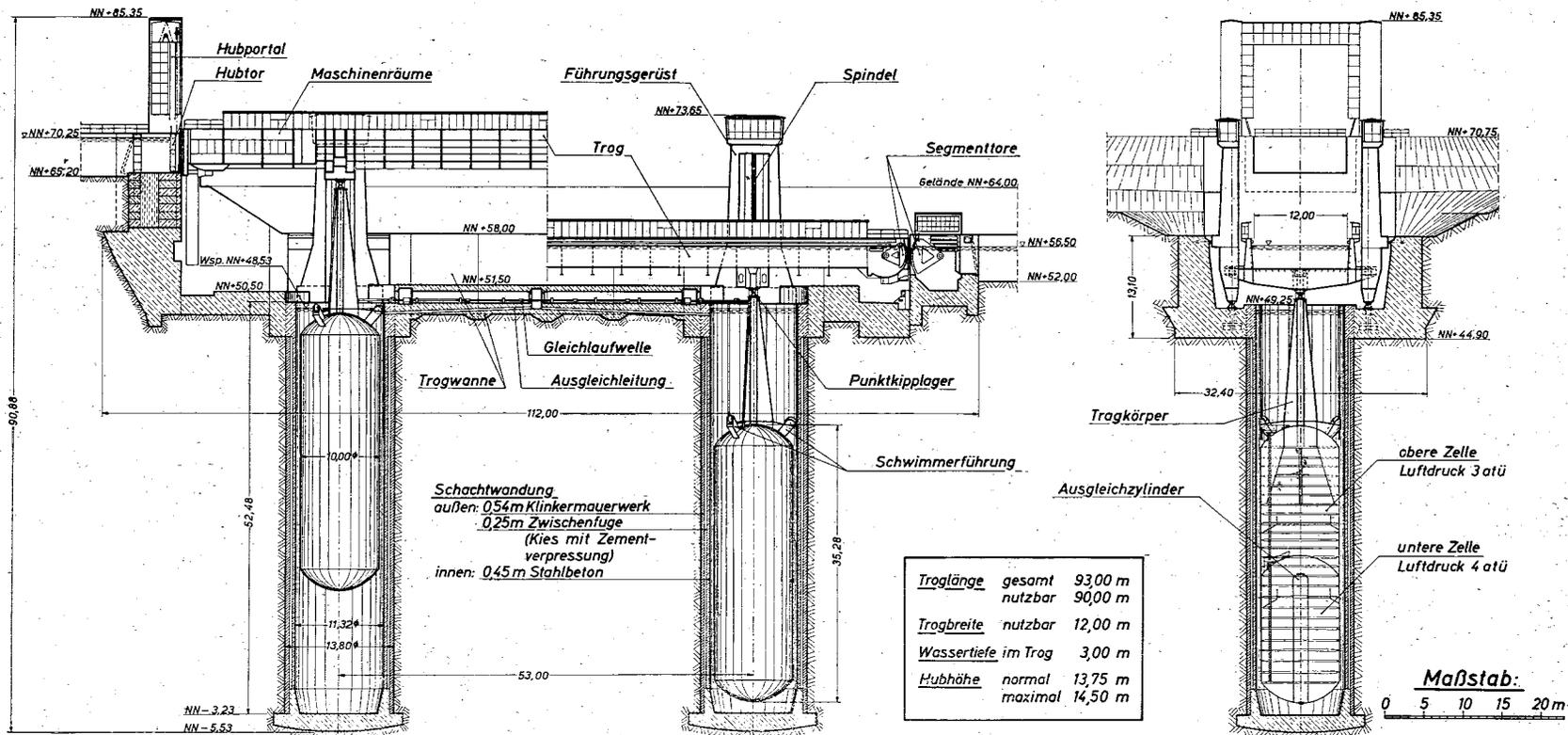


Bild 3
Längsschnitt und Querschnitt

II. SPARSCHLEUSEN FÜR GROSSE FALLHOHEN DES KANALS BAMBERG—NÜRNBERG

1. Kammerfüllung und -entleerung

1.1 Das Füll- und Entleerungssystem

Es wird die Kenntnis des Füll- und Entleerungsvorganges einer einfachen Kammer- und Schachtschleuse vorausgesetzt.

Für die Kanalstrecke Bamberg—Nürnberg sind sieben Stufen geplant, von denen nur die Schleuse Buckenhofen in dem Flußlauf der Regnitz liegt. Die kleine Fallhöhe von 5,35 m und die ausreichenden Füllwassermengen lassen den Bau einer einfachen Kammer- und Schachtschleuse zu. Die übrigen 6 Schleusen liegen im Bereich des Stillwasserkanals und verfügen nicht über die notwendigen Füllwassermengen.

Es müssen Sparschleusen angewendet werden, um die Stufen in einem Vorgang mit geringem Wasserverbrauch zu überwinden. Im Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe wurden unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. H. Wittmann durch Untersuchungen der Aufbau der Gesamtanlage und die hydraulisch günstigsten Formen der einzelnen Bauteile festgelegt.

Schleuse	Hubhöhe m	Anzahl der Spar- becken	Füllzeit T_F nach Modellversuchen		Entleerungszeit T_E nach Modellversuchen	
			sek	min	sek	min
Bamberg	11,00	3	745	12,42	805	13,41
Strullendorf	7,35	1	474	7,90	534	8,90
Buckenhofen (interpoliert)	5,35	—	342	5,70	402	6,70
Hausen	12,00	2	725	12,10	792	13,20
Erlangen	18,30	3	973	16,20	1030	17,20
Kriegenbrunn	18,30	3	973	16,20	1030	17,20
Nürnberg	9,40	1	550	9,17	596	9,93

Tabelle 1: Verzeichnis der Schleusen der Kanalstrecke

Am Beispiel der Sparschleuse Erlangen mit 3 Sparbecken, der Hubhöhe $H = 18,3$ m, einer Kammerlänge $L = 200$ m und einer Kammerbreite $B = 12$ m werden die Ergebnisse erläutert.

Um eine spätere Erweiterung zur zweiten Sparschleuse möglich zu machen, sind die Sparbeckengruppen auf einer Seite der Schleusenkammer angeordnet. Eine Sparbecken-

gruppe besteht aus zwei Teilbecken. Je ein Teilbecken der Sparbecken­gruppe ist durch einen Zubringerkanal mit einem der symmetrisch zur Schleusenquerachse angeordneten Grundlaufsystem verbunden (Bild 4).

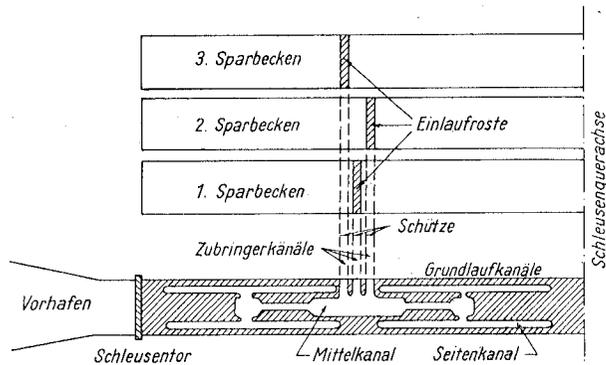


Bild 4
Grundlaufsystem in der Kammer einer Sparschleuse

Durch die Zubringerkanäle strömt das Füllwasser Q aus den einzelnen Teilbecken in eine Beruhigungskammer und teilt sich in die Wassermengen $Q_1 = Q_2$ (Bild 5).

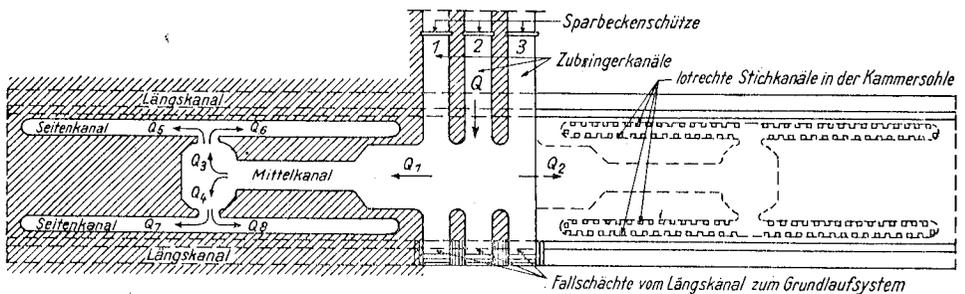


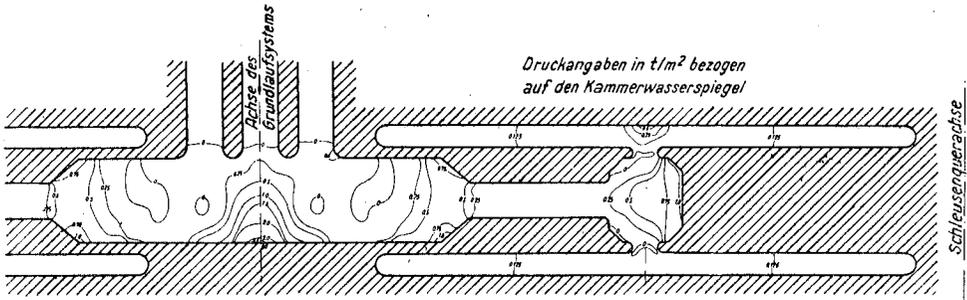
Bild 5
Grundlaufsystem und Zuflußverteilung

Im Mittelkanal wird die Zuflußmenge Q_1 beschleunigt und in der darauffolgenden Beruhigungskammer in die Wassermengen $Q_3 = Q_4$ geteilt. In die Seitenkanäle strömen die Wassermengen $Q_5 = Q_6 = Q_7 = Q_8$, um von hier aus gleichmäßig durch die lotrechten Stichkanäle in der Kammer­sohle = Grundlaufdecke der Schleusen­kammer zugeführt zu werden.

Durch diese Anordnung wird der seitlich zugeführte Strahl des Zubringerkanals beruhigt, in die waagrechte Strömungsrichtung umgelenkt, wieder beschleunigt, um zuletzt durch die symmetrisch angeordneten Stichkanäle lotrecht in die Kammer aufzusteigen. Das Füllwasser wird dadurch über den ganzen Kammerboden so verteilt, daß Querbewegungen des Schiffes nicht auftreten. Da es nicht möglich war, diese Strömungsvorgänge unmittelbar zu messen, waren meßbar nur die auf ein Schiff wirkenden Kräfte und die Drücke auf die Grundlaufdecke. Die auf ein in der Schleusen­kammer liegendes Schiff

wirkenden Kräfte wurden mit Hilfe eines besonderen Meßgerätes am Schleusenmodell 1 : 25 festgestellt. Die zugelassene Längskraft von 0,5 t durfte bei der Füllung und Entleerung nicht überschritten werden. Aus dem Diagramm der Längskräfte (Bild 9) ist der Verlauf der Längskräfte bei einer normalen Füllung ersichtlich.

Die Symmetrie der Druckverteilung zur Längs- und Querachse des Grundlaufsystems läßt die symmetrische Verteilung der Füllwassermenge erkennen (Bild 6).



Druckverteilung an der Grundlaufdecke bei Kammerfüllung durch den mittleren Zubringerkanal mit $Q_{\max} = 70 \text{ m}^3/\text{s}$
Bild 6

1.2 Der Füll- und Entleerungsvorgang

Das Füllen der Schleusenammer erfolgt in der in Bild 7 dargestellten Folge der Teilfüllungen. Die Restfüllung wird dem oberen Vorhafen durch die unter der Einfahrt am Oberhaupt liegenden Einlauftrichter entnommen und den beiden Längskanälen zugeführt,

Füllen der Schleuse (Bergfahrt)

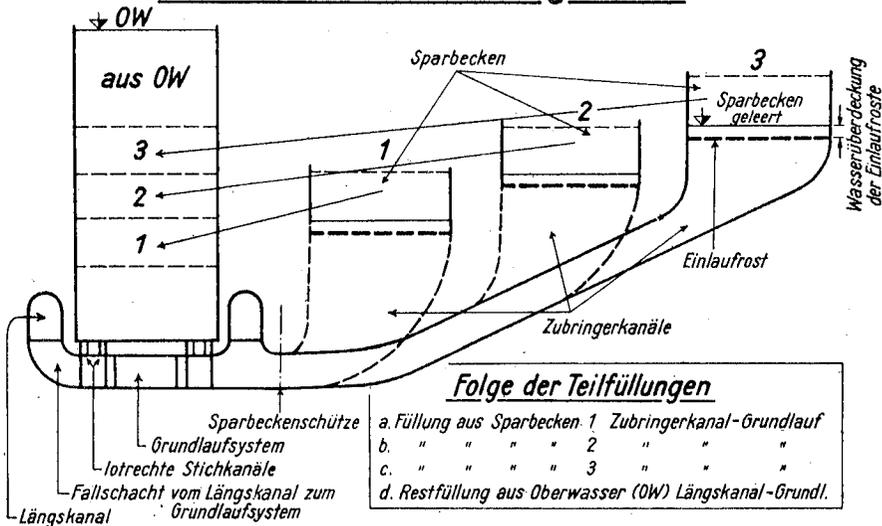


Bild 7
Füllen der Kammer (Bergfahrt)

die durch Fallschächte in die beiden Grundläufe einmünden (Bild 5). Bei der Restfüllung wird das Wasser in den Grundläufen in gleicher Weise wie bei der Füllung aus den Sparbecken verteilt, so daß in jeder Phase der Füllung nur lotrecht nach oben gerichtete Strahlen austreten.

Da bei der Restfüllung bereits ein starkes Wasserpolster vorhanden ist und die Längskräfte am Schiff ohne Bedeutung sind, bestimmt der Entnahmesunk im oberen Vorhafen die Hubgeschwindigkeit der Längskanalschütze.

Entleert wird die Schleusenammer in der Folge der Teilentleerung nach Bild 8. Die Restentleerung erfolgt durch das Grundlaufsystem, die Längskanäle und das Auslaufbauwerk in das Unterwasser. Im Auslaufbauwerk werden die Entleerungsstrahlen der beidseitigen Längskanäle jeweils in vier Teilstrahlen zerlegt und zur Energieumwandlung gegeneinander gelenkt. Die Sohle des Auslaufbettes wird befestigt.

Entleeren der Schleuse (Talfahrt)

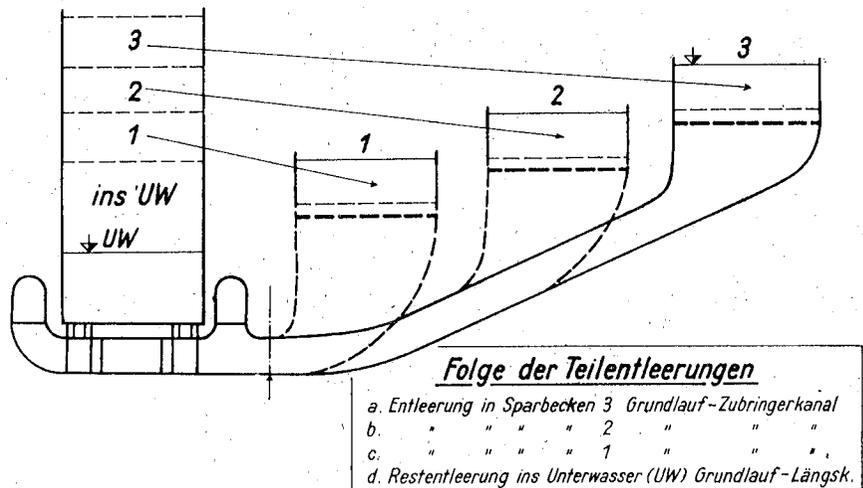


Bild 8
Entleeren der Kammer (Talfahrt)

1.3 Hydraulik des Füllvorganges

Wenn am hydraulischen Modell die Füllzeiten gemessen und die Verlustbeiwerte μ bestimmt sind, lassen sich die Hub- und Zuflußmengen ermitteln.

Für die Füllung aus dem Sparbecken und die Entleerung in die Sparbecken gilt:

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_o} - (\mu_s \cdot \sqrt{2g} (F_s + F) / (2 F_s \cdot F) \times (f \cdot t \pm c_1 \cdot t^{2/2}) \quad (1)$$

$$Q_t = \mu_s (f \pm c_1 \cdot t) \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_t} \quad (2)$$

Es treten drei Phasen auf:

1. Phase: Druckhöhe ändert sich, Schütz wird gehoben.
2. Phase: Druckhöhe ändert sich, Füllquerschnitt bleibt gleich.
3. Phase: Druckhöhe ändert sich, Schütz wird gesenkt.

Für die Restfüllung aus dem Oberwasser und die Restentleerung in das Unterwasser gilt:

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_o} - \mu_R \cdot \sqrt{2g} \cdot 2F \cdot (f \cdot t + c_2 \cdot t^2/2) \quad (3)$$

$$Q_t = \mu_R \cdot (f + c_2 t) \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_t} \quad (4)$$

Es treten zwei Phasen auf:

1. Phase: Druckhöhe ändert sich, Schütz wird gehoben.
2. Phase: Druckhöhe ändert sich, Füllquerschnitt bleibt gleich.

Dabei bedeuten:

H_o = Druckhöhe zu Beginn einer Phase (m)

H_t = Druckhöhe zur Zeit t (m)

F_s = Sparbeckenfläche (m²)

F = Kammerfläche (m²)

f = Füllquerschnitt am Anfang einer Phase (m²)

c_1 = Flächenöffnungsgeschwindigkeit für die Sparbeckenschütze (m²/s)

c_2 = Flächenöffnungsgeschwindigkeit für die Längskanalschütze (m²/s)

Q_t = Füllwassermenge zur Zeit t (m³/s)

μ_s = Verlustbeiwert für die Sparbeckenfüllung und -entleerung gleich groß.

μ_R = Verlustbeiwert für die Restfüllung und -entleerung verschieden.

Für die Sparschleuse Erlangen sind die Hubkurve, die Füllwassermengenkurve, der Fahrplan der Verschlussorgane (Schützfahrplan) und das Längskraftdiagramm in Bild 9 aufgezeichnet.

1.4 Verlustbeiwert

Bei der Füllung mit tiefliegendem Drempe läßt sich die Gesamtfüllzeit in geschlossener Form angeben:

$$T_{ges} = (2 \cdot F \cdot \sqrt{H_o}) / (\mu \cdot \sqrt{2g} \cdot f) + t_e/2 \quad (5)$$

dabei bedeuten:

F = Kammerfläche (m²)

H_o = Druckhöhe (m)

T_{ges} = Gesamtfüllzeit (s)

t_e = Öffnungszeit der Verschlüsse (s)

f = Füllquerschnitt (m²)

Werden die Gesamtfüllzeit T_{ges} und die Öffnungszeit der Verschlüsse im Modellversuch gemessen, so kann aus Gleichung (5) der mittlere μ -Wert errechnet werden:

$$\mu = 2 \cdot F \cdot \sqrt{H_o} / (T_{ges} - t_e/2) \cdot \sqrt{2g} \cdot f \quad (6)$$

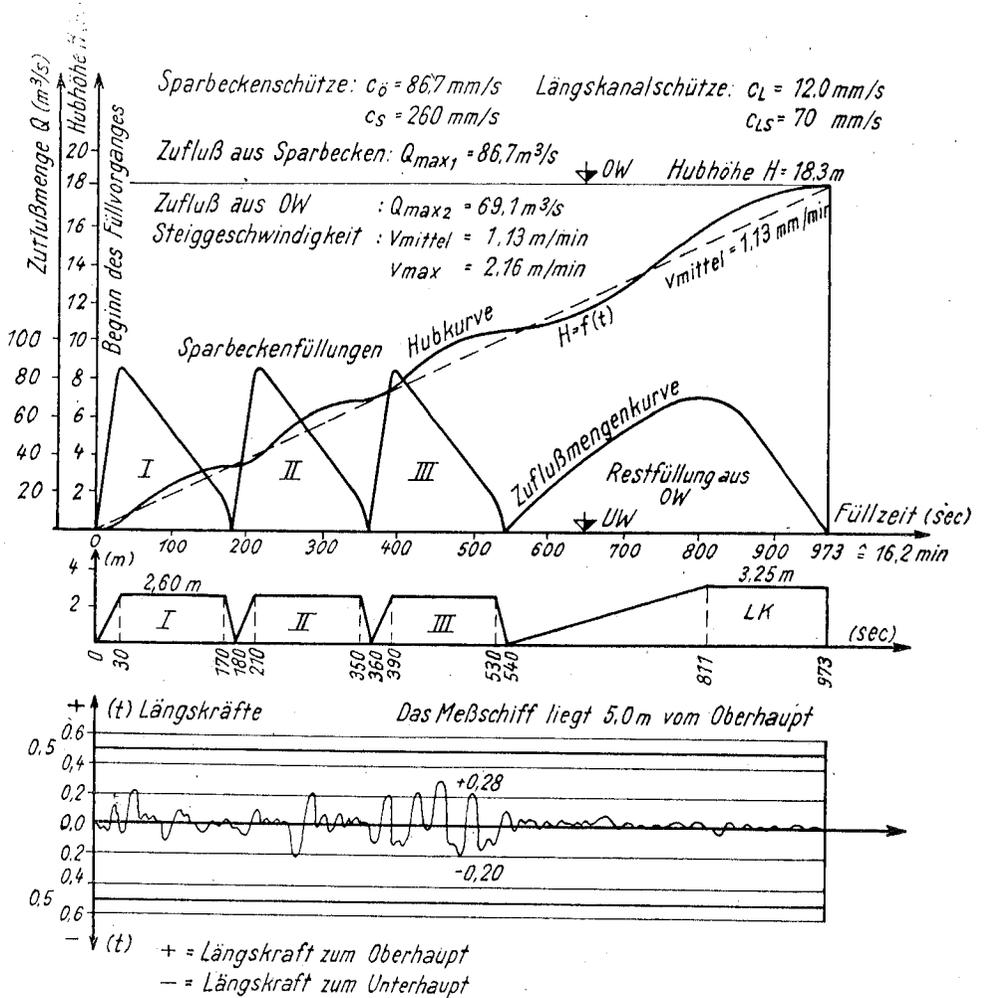


Bild 9

Normalfüllung der Kammer. Füllung aus dem Sparbecken. Restfüllung aus dem OW.

Dieser mittlere μ -Wert setzt sich aus Einlaufverlusten, Krümmerverlusten, Reibungsverlusten, Stoßverlusten und Verlusten am Tiefschütz zusammen. Die Berechnung der Hubkurve und der Zuflußmengenkurve mit dem mittleren μ -Wert ist genügend genau.

1.5 Hub- und Senkgeschwindigkeit der Verschlüsse

Für die Hubgeschwindigkeit der Sparbeckenschütze ist die Größe der Längskraft maßgebend. Bei der Hubgeschwindigkeit von $c_o = 86,7$ mm/s überschreiten die Längskräfte in keinem Fall die zugelassenen 0,5 t. Die Senkgeschwindigkeit wurde mit $c_s = 260$ mm/s = $3 \cdot c_o$ festgelegt.

Durch eine größere Hubgeschwindigkeit der Sparbeckenschütze $c_{\ddot{o}}$ kann die Gesamtfüllzeit T_{ges} nicht wesentlich verkürzt werden (Bild 10).

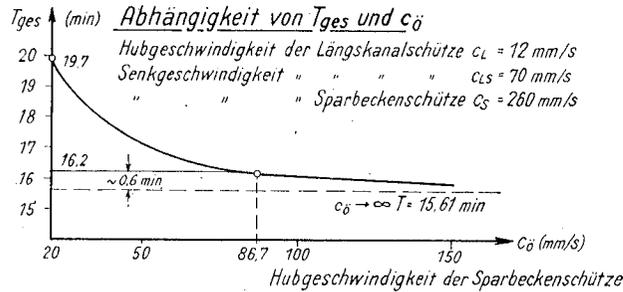


Bild 10
 Abhängigkeit von T_{ges} und $c_{\ddot{o}}$

Für verschiedene Hubgeschwindigkeiten der Längskanalschütze wurden die Schiffskräfte parallel zur Schleusenlängsachse (= Längskräfte) im Modellversuch gemessen. Es ergab sich eine lineare Abhängigkeit im Bereich der Meßgenauigkeit (Bild 11).

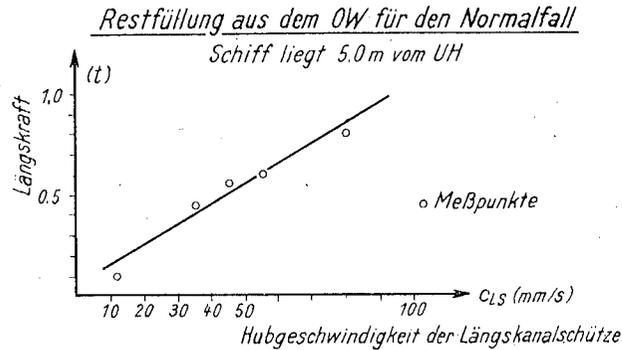


Bild 11
 Restfüllung aus dem Oberwasser für den Normalfall, Schiff liegt 5,0 m vom UH

Maßgebend für die Hubgeschwindigkeit der Längskanalschütze ist die größte Zuflußwassermenge aus dem oberen Vorhafen von $Q_{max} \leq 70 \text{ m}^3/\text{s}$, die bei $c_L = 12 \text{ mm/s}$ erreicht wird. Da die Längskanalschütze bis zur Ausspiegelung geöffnet bleiben, könnten sie auch plötzlich geschlossen werden. Es wurde eine Senkgeschwindigkeit der Längskanalschütze von $c_{LS} = 70 \text{ mm/s}$ gewählt. Die Hub- und Senkgeschwindigkeiten der Längskanalschütze sind für die Füllung und Entleerung gleich.

1.6 Sunk und Schwall in den Vorhäfen und in der Kanalstrecke

1.61 Entnahmesunk im oberen Vorhafen

Die maximale Sunktiefe ergibt sich überschlägig zu:

$$Z_{\max} = Q_{\max} / \omega_m \cdot B_m, \text{ wobei} \quad (7)$$

$$\omega_m = \sqrt{g \cdot F_m / B_m} \quad (8)$$

Q_{\max} = maximale Entnahmewassermenge (m³/s)

F_m = mittlere Querschnittsfläche des Kanals $\approx 196,0 \text{ m}^2$ für $t = 4,0 \text{ m}$

B_m = mittlere Breite der Sunkwelle $\approx 55 \text{ m}$ für $t = 4,0 \text{ m}$

Mit diesen Werten wird $\omega_m = 5,92 \text{ m/s}$ und $Z_{\max} = 21 \text{ cm}$.

Bei einer Wassertiefe von $t = 4,0 \text{ m}$ im oberen Vorhafen und im Kanal kann diese Sunktiefe als ungefährlich angesehen werden, da die größte Abladetiefe der Schiffe 2,50 m nicht überschreitet.

Die größte Neigung der Sunkwellenfront ergibt sich zu:

$$\max J_w = 1/(g \cdot F_m) \times (dQ/dt)_{\max}, \text{ wobei} \quad (9)$$

$$(dQ/dt)_{\max} = (dQ/dt)_{t=0} = \mu \cdot b \cdot c_L \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_R} \quad (10)$$

dabei bedeuten:

μ = Verlustbeiwert = 0,733

c_L = Hubgeschwindigkeit der Längskanalschütze = 12 mm/s

b = Σ Schützbreiten = 4,0 m

H_R = Druckhöhe = 18,30 m

Damit wird

$$\max J_w = 0,35 \text{ ‰} \text{ und die größte Trossenkraft } P_{\max} = 3,45 \text{ t} < P_{\text{zul}} = 5,40 \text{ t} \quad (4\text{-fache Sicherheit})$$

1.62 Füllschwall im unteren Vorhafen

Durch die Wasserrückgabe bei den Kammerentleerungen dürfen die wartenden vertäuten Schiffe im unteren Vorhafen nicht bewegt und die erforderlichen Durchfahrts Höhen unter den Brücken nicht unterschritten werden.

Die Berechnung der maximalen Schwallhöhe Z_{\max} und der maximalen Trossenkraft P_{\max} erfolgt entsprechend der Sunkberechnung im oberen Vorhafen.

2. Störfälle der Schleusenfüllung bzw. -entleerung

Die Anzahl der möglichen Störfälle in Abhängigkeit von der Anzahl der Störelemente beträgt:

$$z = 2^n - 1 \quad (11)$$

dabei bedeutet n = Anzahl der Störelemente.

Für $n = 4$ (3 Sparbeckengruppen, 1 Längskanalschütze) wird $z = 2^4 - 1 = 15$.

Aus Bild 12 ist zu entnehmen, daß die Anzahl der Störelemente möglichst klein gehalten werden muß.

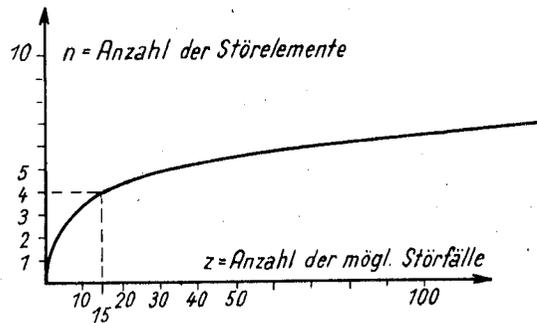


Bild 12
Störelemente

2.1 Ausfall von Sparbecken

Fällt ein Teilbecken aus, so wird die ganze Sparbeckengruppe stillgelegt. Bei Ausfall einer, oder bei gleichzeitigem Ausfall von zwei Sparbeckengruppen wird das Volumen der ausgefallenen Sparbeckengruppen bei der Kammerfüllung zunächst aus dem oberen Vorhafen ergänzt und bei der Kammerentleerung in den unteren Vorhafen abgegeben. Erst dann wird die Füllung aus den betriebsbereiten und die Entleerung in die betriebsbereiten Sparbeckengruppen fortgesetzt.

Beim Ausfall von Sparbecken wird die Schleusenkammer auch in diesen Störfällen symmetrisch zur Längsachse und Querachse der Schleusenkammer gefüllt und entleert. Die dabei auftretenden Längskräfte bleiben $< 0,5$ t.

2.2 Ausfall von einem Längskanalschütz am OH oder UH

Beim Ausfall eines Längskanalschützes erfolgt die Füllung aus dem OW und die Entleerung in das UW nur durch einen Grundlauf, also unsymmetrisch zur Kammerquerachse. Dadurch entstehen Schwall- und Sunkwellen, die an den Kammerstirnwänden reflektiert werden und das Kräftespiel am Schiffskörper ungünstig beeinflussen. Die Hub- und Senkgeschwindigkeiten der betriebsbereiten Längskanalschütze werden wie beim Normalfall der Kammerfüllung und -entleerung beibehalten. Beim ungünstigsten Fall, der Füllung der ganzen Kammer mit nur einem Längskanal aus dem oberen Vorhafen wird die Längskraft um etwa 100 % überschritten.

3. Wasserwirtschaft der Kanalstrecke Bamberg—Nürnberg

3.1 Wasserwirtschaftliche Verhältnisse der Kanalstrecke

Die Haltung zwischen zwei Schleusen stellt einen großen Speicher dar, aus dem die Füllwassermenge der unteren Schleuse entnommen wird. In der freien Strecke geht noch Wasser durch Verdunstung und Versickerung verloren.

Dieser Wasserbedarf wird bei den Haltungen Bamberg, Strullendorf und Buckenhöfen durch Zufluß aus der Regnitz gedeckt. Die Schleusen Hausen, Erlangen, Kriegenbrunn und Nürnberg dagegen werden mit Pumpanlagen ausgestattet, die das Füllwasser der Schleusungen vom Unterwasser in das Oberwasser zurückfördern und die Verluste aus Verdunstung und Versickerung aus der Regnitz ersetzen.

3.2 Wasserersparnis durch Sparbecken

Abhängigkeit der Wasserersparnis von der Anzahl und Größe der Sparbecken bei völliger Ausspiegelung der Wasserspiegel im Sparbecken und in der Schleusenammer.

Für die Wasserersparnis gilt:

$$\begin{aligned} E &= (n \cdot m \cdot h_1 \cdot 100) / ((n + 1) \cdot m \cdot h_1 + h_1) \\ &= (n \cdot m \cdot 100) / ((n + 1) \cdot m + 1) \end{aligned} \quad (12)$$

Wenn Sparbeckenfläche = Kammerfläche wird $m = 1$ und

$$E = n \cdot 100 / (n + 2) \% \quad (13)$$

Für die Sparschleuse Erlangen mit $n = 3$ Sparbecken wird $E = 60 \%$.

Abhängigkeit der Wasserersparnis von der Ausspiegelungsdifferenz zwischen Sparbecken- und Kammerwasserspiegel.

Bei Beginn der Füllung und Entleerung der Sparbecken strömt das Wasser wegen der Druckdifferenz zunächst mit großer Geschwindigkeit in die Füllorgane, verringert sie aber mit zunehmender Angleichung der Wasserstände. Um den Schleusungsvorgang nicht übermäßig zu verlängern, werden die Sparbeckenschütze in den Zubringerkanälen bei einer Wasserspiegeldifferenz von 0,15 m geschlossen. Die diesem Unterschied entsprechende Wassermenge geht dem Sparwasser verloren.

Die Wasserersparnis E bei der Anordnung von Sparbecken beträgt bei gleich großer Sparbecken- und Kammerfläche:

$$E = H - 2(h + e) \quad (14)$$

dabei bedeuten:

H = Hubhöhe (m)

h = Sparbeckenhöhe (m)

e = Ausspiegelungsdifferenz (m)

Für die Sparschleuse Erlangen ergibt sich bei 3 Sparbecken, $h = 3,6$ m und $e = 0,15$ m

$E = 10,8$ m. Das sind 59 % der Hubhöhe von $H = 18,3$ m.

3.3 Ersatz der Füllwassermenge durch Pumpwasser

Die Pumpenleistungen werden so ausgelegt, daß die Schleusungswasserverluste und die Verdunstungs- und Versickerungsverluste in den Kanalhaltungen ersetzt werden können und darüber hinaus den Anliegern der Haltungen Brauchwasser für Landwirtschaft und Industrie zur Verfügung steht. Für die Sparschleuse Erlangen werden 2 Aktivpumpen und 1 Reservepumpe mit je einer Leistung von 3,25 m³/s eingebaut.

An die Pumpanlagen und Pumpwasserleitungen werden folgende Anforderungen gestellt.

Die an der Pumpwasserentnahme und Pumpwasserrückgabe auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten dürfen die Sicherheit der Schifffahrt in den Vorhäfen nicht gefährden.

Die einzelnen Bauelemente der Pumpwasserleitung müssen sich den übrigen baulichen und betrieblichen Einrichtungen der Schleuse anpassen.

Die Entnahme-, Leitungs- und Rückgabeverluste sollen gering sein und einen wirtschaftlichen Pumpbetrieb gewährleisten.

Die Pumpwasserentnahme

Das Pumpwasser wird nicht symmetrisch zur Vorhafenachse an der Sohle entnommen, sondern außermittig in einer Bucht dem Pumpenhaus zugeleitet. Nachteilig sind die Quergeschwindigkeiten an der Streichlinie oberhalb des Pumpenhauses. Es wird daher eine 2,0 m tiefe Tauchwand angeordnet, um die Strömungen in die unteren, von der Schifffahrt weniger berührten Wasserschichten des Vorhafens zu konzentrieren.

Der Pumpwasserauslauf

Vom Pumpenhaus führt der Pumpwasserkanal neben dem Längskanal zum Oberhaupt. Dort wird der Pumpwasserkanal um 60° so umgelenkt, daß die übrigen Bauteile der Schleuse, insbesondere die Füllrichtungen im Oberhaupt nicht berührt werden. Unmittelbar oberhalb der Schleuseneinfahrt teilt sich der Pumpwasserkanal in die beiden Zuleitungskanäle zu den Auslaufrosten. Der Übergang des Pumpwasserkanals wird so ausgebildet, daß Ablösungen und ungleiche Anströmung der beiden Abzweigkanäle nicht auftreten (Bild 13).

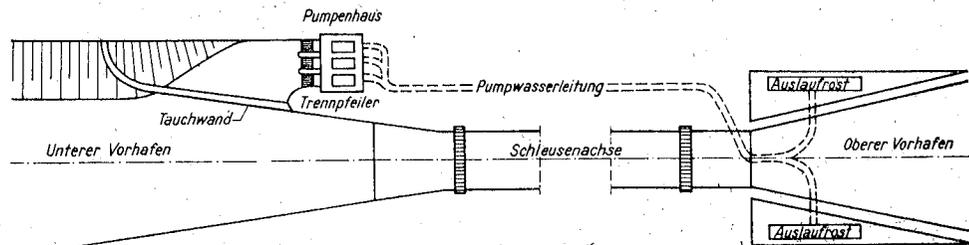


Bild 13
Pumpanlage für eine Kammer

Die beiden Auslaufkanäle münden zunächst in eine Prallkammer unterhalb des Auslaufrostes, der an dieser Stelle nicht geöffnet ist. In der Prallkammer wird die Geschwindigkeitsenergie in Druckenergie umgewandelt, so daß das Pumpwasser ruhig und gleichmäßig aus den symmetrisch angeordneten Auslaufrosten ausströmen kann.

4. Die Verschlüsse für die Füll- und Entleerungseinrichtungen

Mit Rücksicht auf die Wasserersparnis und Betriebssicherheit war eine möglichst einfache und robuste Konstruktion der Verschluss-Bauarten mit einem Mindestmaß an Störanfälligkeit zu wählen. Außerdem sollte bei sämtlichen Sparschleusen unabhängig von ihrer Hubhöhe eine möglichst einheitliche Ausführung aller Verschlüsse erreicht werden, um die Wartungs- und Instandsetzungskosten gering zu halten. In Anbetracht dieser Forderungen wurden folgende Verschlüsse vorgesehen.

4.1 Sparbeckenverschlüsse

Zum Abschluß der Beckenzuläufe (Bild 7, 8) dienen Tiefschütze, die als einfache Rollschütze mit doppelt kehrender Dichtung ausgebildet werden. Ihre Bemessung erfolgt einheitlich nach der größten, für die Sparschleuse Erlangen maßgeblichen Hubhöhe. Das

Öffnen und Schließen dieser Schütze erfolgt über einen öldruckhydraulischen Antrieb. Geschlossen wird der Verschluss etwa 3mal so schnell wie geöffnet. Sämtliche Zylinder wie die zugehörigen Oldruck-Erzeugungsaggregate werden über den mit Dichtdeckeln abgeschlossenen Schächten in der auf einer Seite der Kammer verlaufenden und von einem Laufkran bestrichenen Maschinenhalle eingebaut. Sie sind zentral und übersichtlich angeordnet und jederzeit erreichbar. Der Gefahr von Schwingungen innerhalb der Schüttschächte wurde durch entsprechende Belüftungsmaßnahmen vorgebeugt.

Antriebsmäßig sind jeweils 2 der einander zugeordneten Teilbecken einer Beckengruppe zusammengeschaltet, so daß jeweils 2 Schützen gleichzeitig bewegt, d. h. 2 Becken-Zuläufe geöffnet und geschlossen werden können.

Im Reparatur- oder Störfall ermöglicht ein auf der Kammerseite der Zuläufe angeordneter und von der Maschinenhalle aus jederzeit bedienbarer Notverschluss die Trockenlegung der Schüttschächte und der Zubringerkanäle.

Die Abmessungen der Schütze sind nahezu quadratisch ($2,50 \times 2,60$ m). Ihr Einzelgewicht beträgt rd. 4,5 t.

Die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten der Sparbeckenverschlüsse sind bei allen Zubringerkanälen gleich. $c_{\text{ö}} = 86,7$ mm/s, $c_{\text{s}} = 260$ mm/gs (vergl. Bild 9).

4.2 Längskanalverschlüsse

Die Restfüllung aus dem Oberwasser erfolgt über die Längskanäle, deren Verschlüsse aus einfachen, in den Abmessungen etwas größeren Rollschützen ($2,50 \times 3,25$ m) bestehen. Sie werden ebenfalls als Tiefschütze ausgebildet.

Sie sind nur mit auf der Oberwasserseite anschlagenden Dichtungen versehen. Mit Rücksicht auf die Begrenzung der Zuflußwassermenge aus dem oberen Vorhafen wird deren Öffnungsgeschwindigkeit $c_{\text{ö}}$ auf 12 mm/s ausgelegt, während das Schließen im Schnellschluß ($c_{\text{s}} = 70$ mm/s) vorgenommen wird (Bild 9). Aufgrund der Modellversuche konnten auch diese Geschwindigkeiten für alle Sparschleusen als konstant angenommen werden. Lediglich die Hubwege sind im Einzelfall variabel. Je zwei der Längskanal-schütze werden am Ober- und Unterhaupt zu beiden Seiten der Häupter in entsprechenden Schächten angeordnet. Auch hier sind zur ausreichenden Belüftung der Schächte entsprechende Maßnahmen getroffen.

Der Antrieb erfolgt ebenfalls öldruckhydraulisch, wobei die Zylinder in besonderen Kammern in Nähe der Häupter und die Oldruckerzeugungsaggregate innerhalb der Antriebs-häuser am Ober- und Unterhaupt untergebracht sind.

Für die Bemessung der Längskanalschütze wurden die 6 Sparschleusen der Kanalstrecke in drei Gruppen aufgeteilt, wobei jeweils 2 Schleusen mit annähernd gleichen oder ähnlichen Hubhöhen eine Gruppe bilden, für die eine einheitliche Ausführung der Schüttschächte sichergestellt werden konnte.

Zwecks Instandsetzung im Störfall erhalten die Schüttschächte auf der ober- wie unterstromigen Seite zur Trockenlegung einen Notverschluss. Das Einzelgewicht der Längskanalverschlüsse beträgt etwa 5,6 t.

4.3 Haltungsabschlüsse

Den Abschluß der Kanalhaltung und der Kammern bilden am Oberhaupt ein Hubsenktor und am Unterhaupt ein einfaches Hubtor, beide mit vollem Gegengewichtsausgleich. Ein Hubsenktor wurde gewählt, um im Winterbetrieb durch Absenken des Ober-

tores Eis und bei unzulässigen Wasserspiegelschwankungen auch Überschußwasser und Geschwemsel durch die Kammer abführen zu können. Eine Füllung oder Entleerung der Sparschleuse über diese Tore ist auch in Ausnahmefällen nicht beabsichtigt.

Beide Tore erhalten mechanischen Antrieb, der in den, auf jeder Seite der Häupter gelegenen Antriebshäusern untergebracht wird. Auch die Schächte der Gegengewichte verlaufen innerhalb dieser Aufbauten. Zur Abkürzung der Schleusungszeit werden die Tore mit einer Geschwindigkeit von 1,0 m/Min. geöffnet und geschlossen. Die Ausführung der Torkonstruktion erfolgt für alle Sparschleusen einheitlich. Die Tore sind in Einzelteilen mit gleichen Abmessungen zerlegbar, so daß im Fall einer Beschädigung oder bei Überholungsarbeiten jeweils ein Torenteil oder die gesamte Konstruktion leicht ausgewechselt werden kann. Wie bei den Sparbecken und Längskanalverschlüssen kann auch bei den Toren durch auf der Ober- wie Unterwasserseite eingebaute Notverschlüsse ein Haupt oder die ganze Kammer der Sparschleuse abgeschlossen und trockengelegt werden. Zur Sicherung des Untertores gegen Schiffsstöße wird am Unterhaupt eine besondere Schutzvorrichtung nach dem System der elastoplastischen Verformung eingebaut.

4.4 Steuerung des Füll- und Entleerungsvorganges

Die Steuerung sämtlicher Verschlüsse und Bewegungsvorgänge erfolgt zentral von dem am Unterhaupt gelegenen Steuerhaus aus. Im Normalbetrieb wie in gewissen Störfällen (Abschn. 2) werden die einzelnen Bewegungsvorgänge über bestimmte Programme für die Füllung und Entleerung abgewickelt. Hierzu dienen elektrisch angetriebene Kopierwerke, die zeitabhängig die Schließ- und Öffnungsbewegungen der einzelnen Verschlüsse automatisch steuern. Außer der Automatik wird eine Handsteuerung eingebaut, die im Not- oder Ausnahmefall wie bei Reparaturen die Steuerung der einzelnen Verschlüsse von der Zentrale aus gestattet. Darüber hinaus ist jeder Verschluß auch örtlich von den Antriebshäusern aus (z. B. für die Längskanalverschlüsse und Tore) in jede beliebige Stellung steuerbar.

Besondere Maßnahmen und eingebaute Blockierungen verhindern eine unbefugte oder die Abhängigkeit der einzelnen Bewegungsvorgänge störende Betätigung der Steuerungsorgane und gewährleisten die bei der Berg- und Talfahrt unbedingt erforderliche Betriebssicherheit.

5. Konstruktion und Statik der Sparschleusen

5.1 Formgebung des Kammerquerschnittes

Für die konstruktive Gestaltung des Kammerquerschnittes (Bild 14) waren von der wasserbaulichen Seite her vorgesehen: der Trog, die Längskanäle, das Grundlaufsystem mit den Zubringerkanälen und der Pumpkanal. Weiterhin war es erwünscht, die Maschinenhalle mit den Antrieben für die Verschlüsse der Zubringerkanäle an geeigneter Stelle und in günstiger Höhe über den Kanälen anzuordnen. Daher schied auf der Sparbeckenseite eine massive Kammermauer aus. Ihr Querschnitt wurde aufgelöst in einen massiven Unterteil und in eine Stahlbetonwand oberhalb des Maschinenhausfußbodens. In ähnlicher Weise wurde auch die landseitige Kammermauer ausgebildet. Bei Schleusen von Hubhöhen etwa über 15 m wird die Wand von gleichbleibender Dicke durch schräge Rippen auf den unteren Teil abgestützt. Bei den niedrigeren Schleusen entfallen die Rippen und die Wand wird an der Einspannstelle verstärkt.

Durch die Längs- und Pumpkanäle sind die Mindestabmessungen für den unteren Teil der Mauer festgelegt, der als massiver, starrer Gründungkörper für die aufgesetzte, eingespannte Wand wirkt. Seine Formgebung wird noch im Zusammenhang mit dem statischen System des Kammerquerschnittes behandelt.

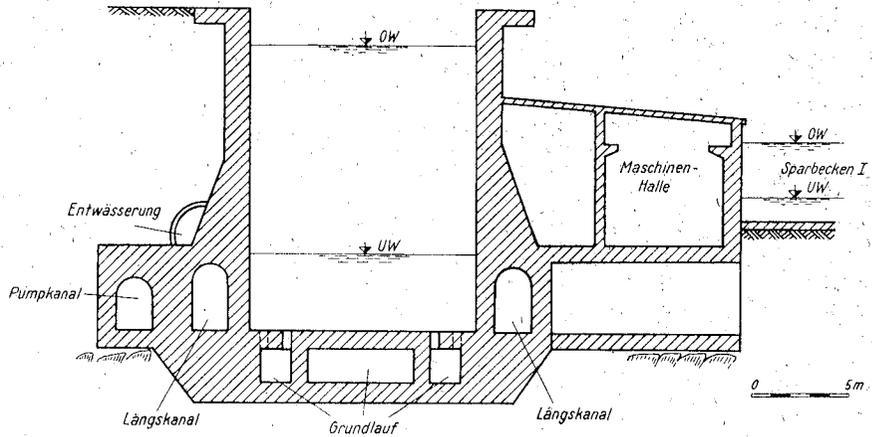


Bild 14

Schleusenammer Hausen. Konstruktiver Querschnitt

Die Kammersohle ist durch das Grundlaufsystem stark gegliedert. Sohlplatte, Decke und Zwischenwände bilden in biegungssteifer Verbindung einen Rahmenträger. Bei den Formänderungen des Rahmenträgers war zu berücksichtigen, daß die Decke in den beiden Außenfeldern durch die Doppelreihen der lotrechten Stichkanäle des Grundlaufsystems stark geschwächt ist.

Die aufgelöste Form des Kammerquerschnittes kam auch den Wünschen der Betontechnik entgegen. Trotz der verhältnismäßig großen Abmessungen des Bauwerkes sind Zusammenballungen von Betonmassen weitgehend vermieden worden, so daß keine ungewöhnlichen Maßnahmen notwendig sind, um die beim Abbinden des Frischbetons entstehende Hydratationswärme abzuleiten. Überdies mußten die Betonzuschlagstoffe von fremden Bezugsquellen unter verhältnismäßig hohen Kosten beschafft werden, so daß auch von der wirtschaftlichen Seite her geringe Betonmengen willkommen waren.

5.2 Statisches System des Kammerquerschnittes

Beim ersten Entwurf sollten die Kammermauern für sich allein standfest sein. Der untere massive Teil der landseitigen Mauer erhielt deshalb eine Kragplatte, um die Erdauflast zu vergrößern und eine günstigere Resultierende zu erzielen. Mauer und Sohle waren durch Gelenke miteinander verbunden, weil die Sohlenplatte im Reparaturzustand ohne Abstützung auf die Mauern unter der Wirkung des Sohlenwasserdruckes aufschwimmen würde. Die Bodenpressung verteilte sich nach dem Bettungszifferverfahren, wie in Bild 15 dargestellt. Aus den Berechnungsergebnissen war zu ersehen, daß die Endquerschnitte von Mauer und Sohle an den theoretischen Gelenken sich gegenseitig mehr verdrehen würden, als dies bei der Höhe der Sohlenkonstruktion von 3,7 m möglich war, die Gelenke wären also nicht in dem notwendigen Umfang wirksam geworden, sondern die Verbindung zwischen Sohle und Mauer wäre doch biegungssteif gewesen.

Dazu kam noch ein konstruktiver Gesichtspunkt. Die Lichtweite der Schleuse ist 12 m; die Bewehrungsstäbe werden in Längen von 15 m geliefert. Schneidet man die über-schüssigen 3 m wegen der Gelenkwirkung ab, dann verbleibt nur ein nutzloses Schrott-material. Es entsteht also tatsächlich kein nennenswerter Mehraufwand, wenn man die Stäbe in voller Länge von Mauer zu Mauer durchgehen läßt und somit alle Teile bie-gungssteif miteinander verbindet.

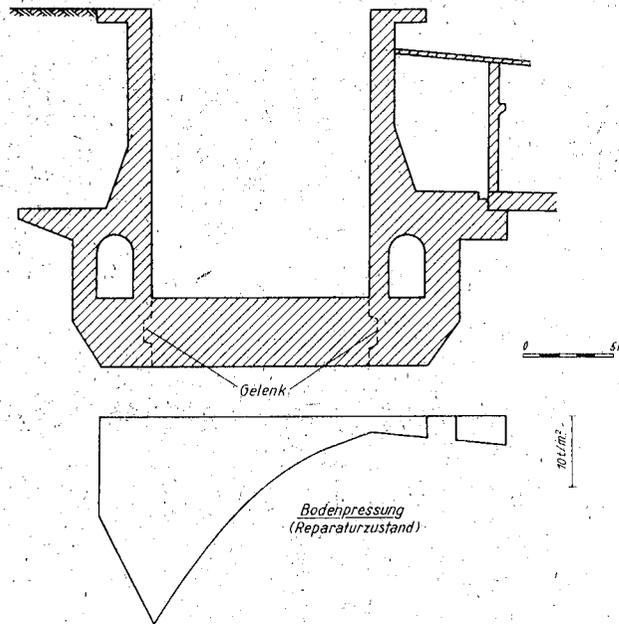


Bild 15

Schleusenammer Bamberg. Statisches System mit Gelenken zwischen Sohle und Mauer

Die zweite Fassung sah deshalb einen biegungsfesten Rahmen aus der Sohle und den beiden Mauern vor. Sohlenplatte und landseitige Mauer sollten jedoch während des Baues vorübergehend durch eine Fuge getrennt werden, damit die Setzungen des Bau-grundes unter der höheren Last der Mauer nicht die Sohlenplatte zusätzlich beanspru-chen. Nach dem Abklingen der Setzungen war die Fuge so zu schließen, daß die bie-gungsfeste Verbindung sichergestellt war. Die Bodenpressung verteilte sich bei diesem System nach Bild 16. Dabei fällt der große Unterschied in der Pressung unter der Mauer und unter der Sohle auf, der sich aus der anfänglichen Trennung beider Bauteile ergibt. Die vorhandenen tonigen Böden konsolidieren aber nur sehr langsam. Es war also zu erwarten, daß auch nach dem Schließen der Fuge die Setzungen weiter gehen und dabei der starke Pressungsunterschied gemildert wird. In grober Annäherung wurde dieser Ausgleich nach der gestrichelten Linie angenommen, selbstverständlich unter Berücksich-tigung der Gleichgewichtsbedingungen. Die vorübergehende Trennungsfuge hätte also die Sohle nur zeitweise entlastet. Außerdem ist sie für den Baubetrieb ungünstig, da sie zusätzlichen Schalungsaufwand verursacht, als offene Stelle den Baubetrieb stört, leicht verschmutzt und schließlich nur in mühevoller Kleinarbeit zu reinigen und auszubeto-nieren ist.

Als dritte Lösung wurde deshalb noch der geschlossene Rahmen ohne Fuge untersucht. Da die Mauer jetzt von Anfang an in die Sohlenplatte eingespannt ist, braucht sie nicht

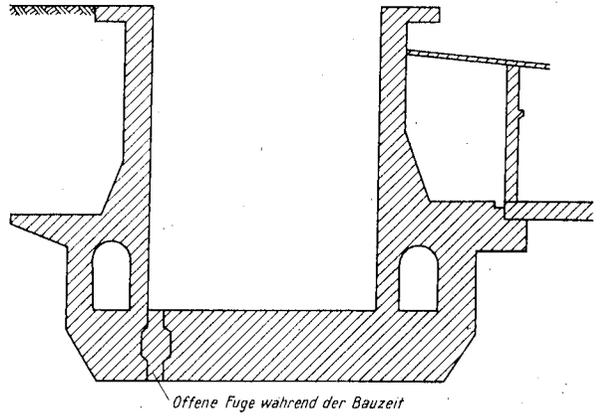


Bild 16
Schleusenammer Bamberg.
Biegungsfeste Verbindung
zwischen Sohle und Mauer
und einer offenen Fuge wäh-
rend der Bauzeit

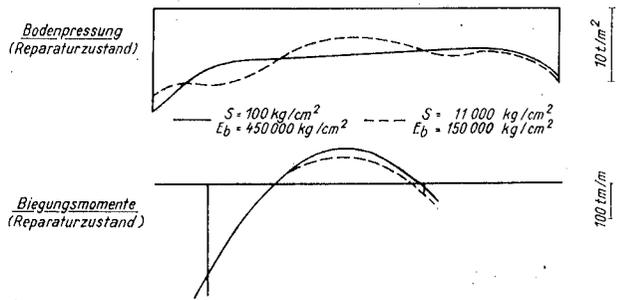
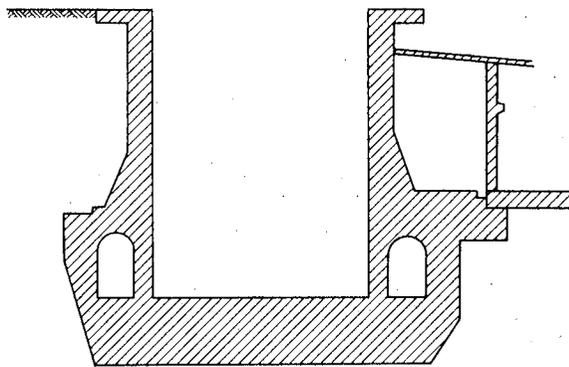
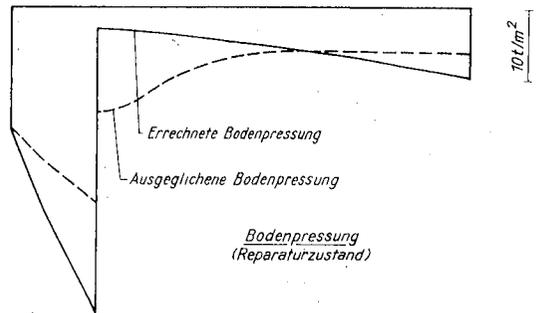
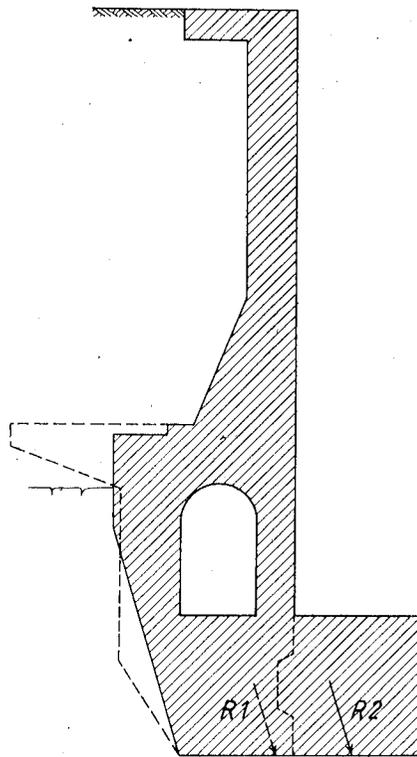


Bild 17
Schleusenammer Bamberg.
System mit biegungsfester
Verbindung zwischen Sohle
und Mauern

allein standfest zu sein. Alle Maßnahmen zur Erhöhung der lotrechten Komponente der Resultierenden können daher entfallen. Die Kragplatte wird überflüssig und die Betonmassen des unteren Teiles können so knapp wie möglich gehalten werden. Bild 18 zeigt die Beeinflussung der Resultierenden durch die Veränderung des Mauerquerschnittes. Damit verringert sich aber auch die Bodenpressung unter dem Mauerteil und der Setzungsunterschied gegenüber der Sohlenplatte. Das Berechnungsergebnis für diese Lösung zeigt, daß sie vor allen anderen den Vorzug verdient, so daß sie zur Ausführung gewählt wurde. Ausgenommen davon bleibt nur das Unterhaupt, bei dem wegen der baulich bedingten, großen Masse der Hauptpfeiler in jedem Falle eine vorübergehende Trennfuge angebracht ist. Die Sohlenplatte der Kammer selbst aber wird in einem Arbeitsgang auf beiden Seiten bis zu den Mauerrückseiten durchgehend ausgeführt, und auf ihr werden die Mauern aufbetoniert. Die Bodenpressungen unter diesem System wurden nach dem Verfahren von Kany berechnet, d. h. das Formänderungsverhalten des Baugrundes ist weitgehend berücksichtigt. Dabei wurde der Unsicherheit in der Steifenzahl S des Bodens und in der Elastizitätszahl E des Betons Rechnung getragen, indem die Grenzwerte der Pressung einmal für weichen Boden und steifen Beton und zum anderen für steifen Boden und weichen Beton ermittelt wurden. Bild 17 zeigt das Ergeb-



*R1, R2 = Resultierende aus Erddruck,
Wasserdruck und Eigengewicht*

Bild 18

Schleusenammer Bamberg. Beeinflussung der Resultierenden in der landseitigen Kammermauer durch Veränderung des Mauerquerschnittes

nis. Wenn auch der Unterschied der Bodenpressung mit maximal $\pm 20\%$ des Mittelwertes beträchtlich erscheint, so weichen doch die daraus errechneten Bemessungsmomente an der Einspannstelle der Sohle nur um $\pm 1\%$ und in Sohlenmitte um $\pm 14\%$ vom Mittelwert ab.

5.3 Belastung der Kammermauern

Eine Sonderfrage sei hier noch kurz gestreift, die gerade bei den Schleusen mit großer Hubhöhe und aufgelöstem Querschnitt eine Rolle spielt. Beide Wände werden bei voller Kammer durch einen hohen seitlichen Wasserdruck nach außen, die landseitige Wand bei leerer Kammer durch den Erddruck nach innen belastet. Diese Kräfte wachsen mit dem Quadrat der Schleusenhöhe. Es wachsen auch die Verformungen aus der Verbiegung der Wand und aus der Neigung des Fundaments infolge der Nachgiebigkeit des Baugrundes.

Der Bemessungsfall für die landseitige Kammermauer ist der Reparaturzustand, bei dem die Kammer leer ist. Der Winkel α , um den sich die Wand unter dem Erddruck neigt, ist nicht in jedem Fall oder an jeder Stelle groß genug, um in dem dahinter liegenden Erdreich die Bedingungen des aktiven Erddruckes zu erfüllen, d. h. einen abrutschenden Erdkeil entstehen zu lassen. Die Belastung der Wand liegt also zwischen dem aktiven Erddruck und dem Ruhedruck. Der dazugehörige Erddruckbeiwert wurde nach einem Berechnungsvorschlag von Prof. Dr. Jelinek, Technische Hochschule München, auf die Neigung α der Wand abgestimmt.

Das Verfahren geht von dem in Versuchen ermittelten Winkel α' aus, um den eine Wand gekippt werden muß, damit hinter ihr der Erddruck auf den aktiven Grenzwert absinkt. Ihm wird der tatsächlich vorhandene Neigungswinkel α der Wand gegenübergestellt, der sich aus zwei Anteilen zusammensetzt: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$. α_1 ist die Neigung des Fundamentes, die aus den Setzungen bei trapezförmig verteilter Bodenpressung berechnet wird; α_2 ist die Neigung aus der Verbiegung der Wand selbst infolge des angreifenden Erddruckes. Ist $\alpha = 0$, d. h. neigt sich die Wand nicht, dann wirkt der Ruhedruck; ist $\alpha \geq \alpha'$, dann entwickelt sich der aktive Erddruck. Für die dazwischen liegenden Fälle $0 < \alpha < \alpha'$ gibt Jelinek eine empirisch ermittelte Beziehung zwischen dem Erddruckbeiwert λ und der Neigung α an: $\lambda = \lambda(\alpha)$.

Im Gegensatz zur hinterfüllten, landseitigen Kammermauer, für welche diese Überlegungen gelten, ist das Kräftebild der Mauer auf der Sparbeckenseite durch den einseitigen Wasserdruck bei gefüllter Schleuse bestimmt. Die Resultierende dieser Mauer ist nach außen geneigt, so daß sich beträchtliche Pressungen auf der Mauerrückseite ergeben.

III. WEITERENTWICKLUNG DER ROTHMUNDSSCHEN TAUCHSCHLEUSE

1. Rückblick und Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten zur Überwindung großer Fallhöhen

Mit der Ausbildung der Betriebsanlagen zur Überwindung großer Höhen in Wasserstraßen haben sich bereits mehrere Schiffahrtskongresse beschäftigt. So der IX. Internationale Schiffahrtskongreß in Düsseldorf, der die aus Anlaß der Planung des Donau-Moldau-Kanals durchgeführte Diskussion dieser Frage mit der Empfehlung abschloß, eine geneigte Ebene mit Trockenförderung auszuführen und zu erproben. Ein derartiger Betrieb ließ sich jedoch mit der damaligen Bauweise der Schiffe nicht erreichen.