

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  $\alpha$ , 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  $\alpha$  der Wand abgestimmt.

Das Verfahren geht von dem in Versuchen ermittelten Winkel  $\alpha'$  aus, um den eine Wand gekippt werden muß, damit hinter ihr der Erddruck auf den aktiven Grenzwert absinkt. Ihm wird der tatsächlich vorhandene Neigungswinkel  $\alpha$  der Wand gegenübergestellt, der sich aus zwei Anteilen zusammensetzt:  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ .  $\alpha_1$  ist die Neigung des Fundamentes, die aus den Setzungen bei trapezförmig verteilter Bodenpressung berechnet wird;  $\alpha_2$  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  $\lambda$  und der Neigung  $\alpha$  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.

Auch der XVII. Internationale Schiffahrtskongreß in Lissabon nahm zu der Frage des Überwindens großer Gefälle Stellung. Die Diskussion und die Schlußfolgerung des Kongresses waren zu dieser Zeit offensichtlich durch die technischen Fortschritte des Schleusenbaues in Frankreich stark beeinflußt, die durch Erhöhung der Steig- bzw. Fallgeschwindigkeiten bis über 5 m/Min bei der Füllung bzw. Entleerung der Schleusenkammern zu einer weitgehenden Erweiterung des Anwendungsbereiches von Schleusen führten. Insofern ist die vom Kongreß beschlossene Empfehlung durchaus zu verstehen, die für nicht allzu große Höhenunterschiede den Bau von Schleusen vorschlägt, falls nicht besonders steile Gefälle zu überwinden sind oder der Wasserverbrauch eingeschränkt werden muß. In diesen Fällen sowie bei besonders hohen Gefällsunterschieden werden nach der Schlußfolgerung des Kongresses „wahrscheinlich Schiffshebwerke oder Schrägaufzüge wirtschaftlicher sein und im Falle eines intensiveren Verkehrs einen Zeitgewinn beim Durchschleusen gestatten“. Wenn die Wahl auf Schiffshebwerke und Schrägaufzüge beschränkt bleibt, wird den Schiffshebwerken bei Schiffseinheiten mit größerer Lade-fähigkeit der Vorzug gegeben.

Der XIX. Schiffahrtskongreß in London gab nochmals Gelegenheit, die Frage der Überwindung großer Fallhöhen im Rahmen der Mitteilung 1 zu behandeln. Deutschland gab hierzu einen interessanten Vergleich der damals bestehenden Schwimmerhebwerke in Henrichenburg (I) und Rothensee sowie des Gegengewichtshebwerkes in Niederfinow. Im einzelnen darf auf diesen Bericht verwiesen werden [13] und [14]. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Feststellung, daß Gegengewichtshebwerke in der Höhe an keine Grenzen gebunden sind. Die Ausführung von Schwimmerhebwerken über 20 m wird von der einwandfreien Fertigung der auf Zug und Torsion beanspruchten Spindeln abhängig gemacht. Für diesen Fall werden selbstsperrende Gewinde abgelehnt, um sie vor Drehschwingungen zu bewahren. Die Wirtschaftlichkeit von Schwimmerhebwerken bei höheren Gefällsstufen wird außerdem von der Ausführung der Schwimmerschächte abhängen. Als Ausweidlösung wird bei größeren Höhen bzw. bei ungeeignetem Untergrund die Ausführung von Seitenschwimmerhebwerken vorgeschlagen. Konkrete Vorschläge für die Bauausführung derartiger Bauwerke lagen dem Bericht nicht bei. Es darf auf das vorhandene Schrifttum verwiesen werden [17], [18].

Inzwischen wurde das neue Schiffshebwerk Henrichenburg (III) als Mittelschwimmerhebwerk in der bewährten Bauweise der bestehenden Schwimmerhebwerke (Henrichenburg [I] und Rothensee) fertiggestellt und in Betrieb genommen. Mit seinem max. Gefälle von 14,5 m kann es eigentlich noch nicht zu der Kategorie von Hebwerken zur Überwindung großer Fallhöhen gerechnet werden, zumal Schleusen bereits Gefälle von 26 m und mehr überwinden.

Dagegen ist der in Ronquières (Belgien) im Bau befindliche Schrägaufzug, der mit Naßförderung arbeiten wird, mit einem Höhenunterschied von 68 m ein erster Versuch, auch mit größeren Schiffseinheiten derartige Gefällsstufen zu überwinden und damit die Leistungsfähigkeit der Wasserstraße wesentlich zu steigern. Es ist interessant festzustellen, daß ein gleichartiger Vorschlag von Konz vor über 40 Jahren für die Verbindung des Neckar mit der oberen Dona (Plochingen—Ulm) und für den Anschlußkanal von Ulm zum Bodensee gemacht wurde.

Schiffshebwerke mit Naßförderung werden zur Verminderung der Antriebskosten in der Regel einem Gewichtsausgleich für den wassergefüllten Trog erhalten. Der Gewichts-ausgleich bestimmt im wesentlichen die Art der Konstruktion sowie die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit des Bauwerks. Die verschiedenartigen Möglichkeiten für die Ausführung von Gegengewichtshebwerken sind bekannt, soweit sie bereits bestehen oder durch eine Planung bekannt wurden.

## 2. Der Trog als Gegengewicht

Auf der Suche nach einem möglichst einfachen Gewichtsausgleich ist man bereits Ende des 18. Jahrhunderts auf den Gedanken gekommen, den Trog selbst für diesen Zweck zu benutzen, indem man ihn als wasserdichte, druckfeste zylindrische Kammer ausbildet, die im Wasser schwebt und im wesentlichen nur geführt zu werden braucht. Diese einfachste Form des Gewichtsausgleichs erspart besondere Konstruktionen hierfür außerhalb des Trogkörpers.

### 2.1 Ältere Vorschläge und Ausführungen von Tauchschleusen

Nach diesem Prinzip wurde die von Welden in Dunkerton bei Both (Somerset Canal 1798) hergestellte Tauchschleuse betrieben. Sie hatte ein Gefälle von 13,7 m und konnte von Fahrzeugen bis zu 20 t Tragfähigkeit benutzt werden, bis die Stirnwand infolge des

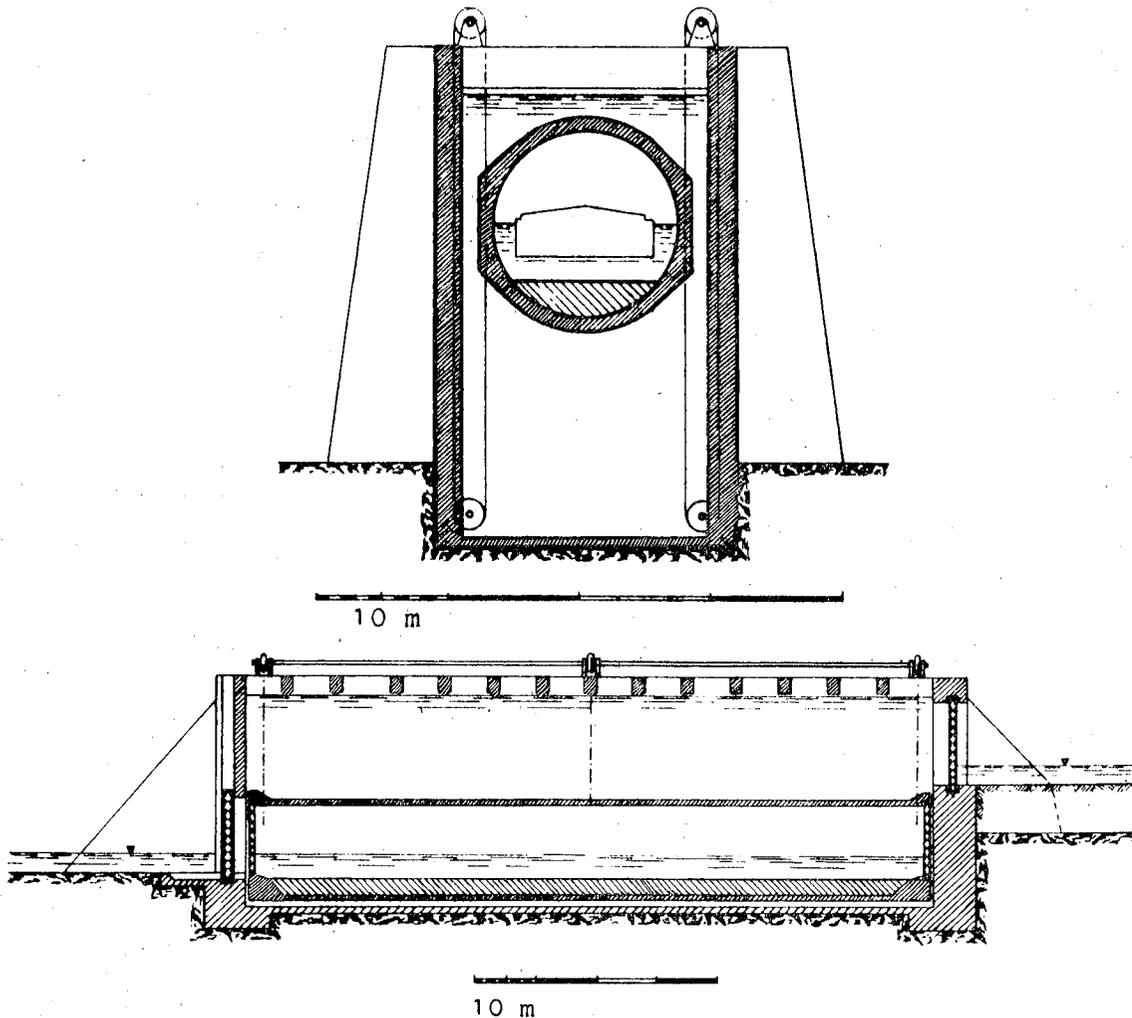


Bild 19  
Tauchschleuse nach Rowley

hohen Wasserüberdrucks einstützte [19]. Hierzu ist aber auch der Vorschlag von Rowley zu rechnen, der das Modell seiner Unterwasserschleuse beim Schiffahrtskongreß in Manchester 1890 vorführte. Während bei der Bauweise Welden der in einem wasser-gefüllten Schacht schwimmende zylindrische Trog mit den zu schleusenden Schiffen durch Lenzen und Fluten gehoben bzw. gesenkt wurde und dadurch über den Wasserspiegel des Schachtes zur Aus- und Einfahrt der Schiffe auftauchen konnte, bleibt der Trog nach dem Vorschlag von Rowley ständig unter Wasser (Bild 19). Diese Maßnahme bedingt im Wasserschacht einen um 8—10 m höheren Wasserstand gegenüber dem Wasserspiegel der oberen Haltung, damit die Schiffe bei gleichen Wasserständen im Trog wie in den Haltungen ein- und ausfahren können.

Daß sich der recht einfache und überzeugende Gedanke des im Wasser schwebenden Troges im Hebewerk mit Ausnahme der Ausführung nach Welden in Dunkerton bisher nicht durchgesetzt hat, ist zunächst überraschend. Andererseits ist nicht zu verkennen, daß das Bauhandwerk damals nicht in der Lage war, die auftretenden technischen Probleme zu meistern. Im Mauerwerksbau läßt sich wohl auch heute noch nicht mit der erforderlichen Sicherheit eine senkrechte Stirnmauer ausführen, die einem Wasserdruck von 13,7 m auf längere Zeit standzuhalten vermag und dabei eine vollkommene Abdichtung gewährleistet. In späterer Zeit, als der technische Fortschritt mit dem Stahl- und Spannbeton durchaus zuverlässige Bauausführungen gewährleisten konnte, waren es vor allem psychologische Gründe, die eine Verwirklichung dieses überraschend einfachen Gewichtsausgleichs nicht zuließen.

Inzwischen hat der schöpferische Ingenieur der Welt eine Fülle von bemerkenswerten Verkehrsbauten beschert, deren Verwirklichung noch vor wenigen Jahrzehnten für die meisten ein Zukunftstraum war. Heute empfindet wohl kaum ein Verkehrsteilnehmer Furcht oder Angst, wenn er einen Tunnel durchfährt, gleichgültig ob er 10 oder 100 m unter dem Wasserspiegel oder dem Gebirge liegen sollte. Statt der Tunnel sind bereits Tunnelbrücken vorgeschlagen worden, wenn wegen der tiefen Gründung weder Tunnel noch Brücken wirtschaftlich zu erstellen sind. Auch diese Bauweise wird eines Tages so zuverlässig entwickelt sein, daß für die Benutzer später keinerlei Risiko besteht. Man kann daher durchaus die Auffassung vertreten, daß dieser Zeitpunkt auch für die Anwendung des im und unter Wasser schwebenden Troges gegeben ist. Die Sicherheit für die Schiffsbesatzungen dürfte auf Grund der vorliegenden Erfahrungen mit U-Booten oder Tauchschiffen gewährleistet sein.

## 2.2 Die Rothmundsche Tauchschleuse

Rothmund hat das ursprüngliche Ziel von Welden, den Tauchkörper aus dem Oberwasser auftauchen zu lassen, mit der Entwicklung seiner Tauchschleuse wieder aufgegriffen. Außer einem sehr einfachen und wirtschaftlichen Betrieb können mit dieser Lösung folgende Vorteile erreicht werden [20]:

1. Der austauchende Trog stellt sich automatisch in seiner Endstellung auf den u. U. wechselnden Wasserstand des Oberwassers ein,
2. das obere Haltungstor kann entfallen, wenn die Gesamtanlage, wie bisher bei Hebewerken üblich, durch Sicherheitstore abgeschlossen wird,
3. aus dem Wasserschacht entweichendes Wasser (Spaltwasser oder dgl.) braucht nicht zurückgepumpt zu werden.

Statt zu lenzen und zu fluten, verwendet Rothmund für das Austauchen des Troges Luft, die der Luftkammer für diesen Vorgang zugeführt wird (Bild 20). Damit bleibt der Energieaufwand während des Austauchens ebenso gering wie während der Tauchfahrt

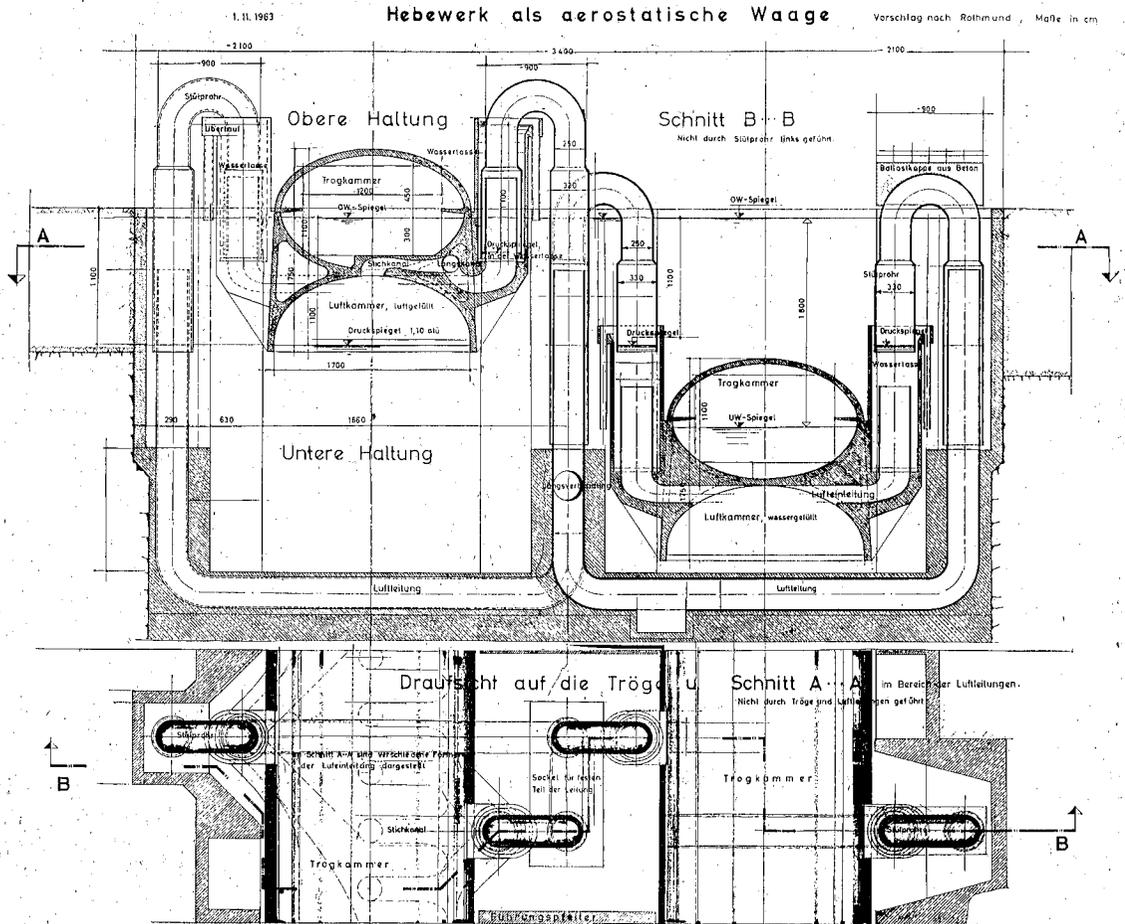


Bild 20  
Tauschschleuse nach Rothmund

im Schwebезustand unter Wasser. Der Trogzylinder verliert nach dem Archimedischen Prinzip beim Auftauchen soviel an Auftrieb wie sein jeweils ausgetauchtes Volumen im eingetauchten Zustand an Wasser verdrängt hat. Wird nun eine dem ausgetauchten Trogvolumen jeweils entsprechende Wassermenge im Luftkammerraum des Troges durch die nahezu gewichtslose Luft ersetzt, so kann damit ein Auftrieb bewirkt werden, der genau dem Auftriebsverlust beim Austauchen entspricht und den Gleichgewichtszustand auch beim Austauchen gewährleistet.

Rothmund verwirklicht diesen Gedanken durch Einführung einer Zwillings-Tauchschleuse, d. h. zwei völlig gleichartige, in einem mit der oberen Haltung ausgespiegelten Schacht oder Tauchbecken schwimmende Schiffströge bewirken die Schleusungen in einem ständigen, miteinander gekoppelten Pendelbetrieb. Die Schiffströge sind auf ihre ganze Länge und Breite mit Luftkammern oder Luftglocken verbunden, die unter dem Boden des Schiffstroges liegen und nach unten offen sind. Ihr lichter Raum entspricht nach Form und Größe völlig dem oberen austauchenden Teil der Trogkörper. Die Luftkammern

beider Tröge sind jeweils durch 2 oder mehr festeingebaute U-förmige Rohrleitungen miteinander verbunden, über die gleichfalls in entsprechender Anzahl U-Röhre (Stülprohre) gestülpt werden, um den pendelnden Druckausgleich herbeizuführen. Hierdurch wird das Unter- und Austausch der Schleusenkörper unter Aufrechterhaltung des Gleichgewichts erreicht. Eine besondere Dichtung des Luftsystems erübrigt sich, da die Stülprohre in Wassertassen einmünden, die stets einen ausreichend hohen Wasserdruck ermöglichen und damit die erforderliche Dichtung sicherstellen. Bei der gleichzeitigen Ein- bzw. Austauschfahrt der beiden Tröge bleibt der Grenzspiegel zwischen Druckluft und Druckwasser in der durch Form und Gewicht des Troges bestimmten Tiefenlage unverändert bestehen.

Jeder Trogkörper wird nach den Vorschlägen von Rothmund an seinen 4 Ecken mit Gelenkzahnstangen an Windwerke angeschlossen, die durch ein sie verbindendes mechanisches Wellenviereck zum Gleichlauf gezwungen werden. Damit soll sichergestellt werden, daß die Bewegung der Tröge stets in waagerechter Lage erfolgt.

Die Ausbildung der Tore ist während der langen Entwicklungszeit mehrfach geändert worden. Der maßgebende Vorschlag sieht für den Abschluß der Schiffströge-Senktole vor, die sich im Tauchzustand des Troges infolge Wasserdruck fest gegen den Dichtungsrahmen anpressen. Ein oberes Haltungstor ist wegen des im Tauchbecken und in der oberen Haltung stets ausgespiegelten Wasserstands nicht erforderlich. Das untere Haltungstor kann entsprechend mit dem unteren Abschlußtor des Wasserschachtes oder Tauchbeckens zusammengefaßt und im unteren Teil der Stütz- oder Staumauer angeordnet werden, die damit gleichzeitig die obere Haltung gegen das Unterwasser absichert. Auch hier ist ein Senktor vorgesehen, das mit hohem Wasserdruck gleichfalls gegen einen Dichtungsrahmen gepreßt und daher mit Sicherheit zuverlässig dicht schließen wird. Falls Bedenken gegen den Fortfall der Doppelsicherung bestehen sollten, sei an die Ausführung von Schachtschleusen mit hohem Gefälle erinnert, die gleichfalls nur mit je einem Tor gesichert sind. Bei Hebewerken werden dagegen stets noch Sicherheitstore vorhanden sein.

Für die Aus- und Einfahrt eines Schiffes werden in der oberen Haltung zweckmäßig beide Trogtore geöffnet, um den Schiffswiderstand aus der Wasserverdrängung möglichst klein zu halten. Bevor Trog- und Schachttor am Unterwasser nach erfolgter Tauch- und Unterwasserfahrt eines der Trogkörper geöffnet werden können, muß der auf der Stirnseite des Troges vorhandene Dichtungsrahmen gegen die ebene, sorgfältig bearbeitete gepanzerte Dichtungsfläche der Stützwand eingefahren sein. Das soll nach den Vorschlägen von Rothmund dadurch geschehen, daß der gesamte Trog gegen die Stirnwand gefahren wird und hier nunmehr nach Ablassen des Spaltwassers durch den hohen Wasserdruck gegen die Dichtungsfläche gedrückt wird. Nach Festlegen des Trogs können die Senktore geöffnet werden.

Der Betrieb einer Tauchschleuse wird bei Zwillingsbetrieb nach der Bauweise Rothmund wie folgt abgewickelt:

1. Ausgangsstellung Trog I im Unterwasser, Trog II ausgetaucht im Oberwasser. Im Trog I ist die Einfahrt der Schiffe beendet.
2. Trog I fährt nach Schließen der Haltungs- und Trogtore, Einbringen von Spaltwasser und Entriegeln aufwärts, bis seine Oberfläche den Wasserspiegel der oberen Haltung berührt.
3. Inzwischen ist auch bei Trog II die Einfahrt der Schiffe beendet. Die Trogtore sind geschlossen worden. Anschließend wird der Trog II mit Hilfe der Windwerke um einen geringeren Betrag in das Wasser gedrückt. Der dadurch entstehende geringe Luftüberdruck  $\Delta p$  bewirkt, daß die Pendelluft sofort in die Luftkammer des auftauchenden Troges strömt. Gleichzeitig beginnt Trog II einzutauchen.

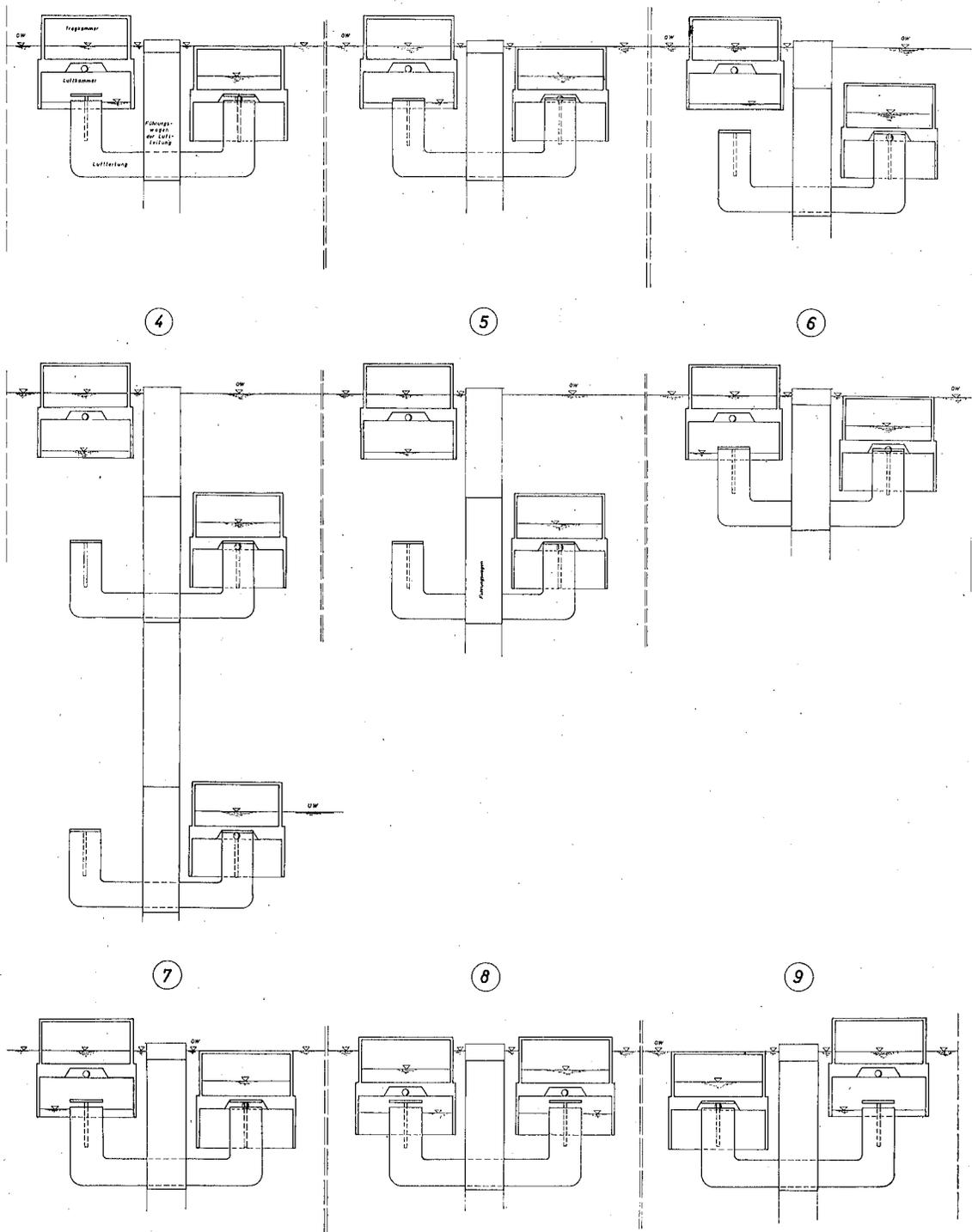


Bild 21  
Darstellung der Hubvorgänge der weiterentwickelten Tauchschleuse

4. Wenn Trog II bis zum Wasserspiegel der oberen Haltung eintaucht, ist der Luftaustausch beendet, die Unterwasserfahrt kann beginnen. Gleichzeitig ist Trog I vollständig ausgetaucht. Die Trogtore können geöffnet werden, damit die Ausfahrt der Schiffe und Neubelegung der Trogkammer erfolgen kann.

In Bild 21 sind die einzelnen Betriebsvorgänge unter Berücksichtigung der neuen Vorschläge dargestellt und erläutert. Ohne Zweifel ist der von Rothmund vorgeschlagene Zwillingsbetrieb die wirtschaftlichste Lösung für Tauchschleusen, die mit Sicherheit auch die größte Leistungsfähigkeit haben wird. Für die Fälle, in denen der Verkehr erst im Anfang seiner Entwicklung steht, hat Rothmund vorgeschlagen, zunächst nur einen Trog zu betreiben, und zwar in Verbindung mit einem einfachen Gegenschwimmer. Trog und Gegenschwimmer haben das gleiche Durchschnittsgewicht/lfdm und sind durch eine Luftspannung von etwa 1,1 atü im Gleichgewicht gehalten.

---

#### Anmerkungen zu Bild 21

- ① Der linke Trog hat nach Auftauchen die Endstellung im Oberwasser erreicht. Der rechte Trog kann nach Überleitung der Luft in die Luftkammer des linken Troges abtauchen. Schließen der Luftleitung.
- ② Öffnen des Trogtores des linken Troges zur Aus- und Einfahrt der Schiffe.
- ③ Der rechte Trog fährt mit der Luftleitung abwärts. Inzwischen Aus- und Einfahrt der Schiffe beim linken Trog.
- ④ Der rechte Trog und die Luftleitung haben die Wasserspiegelhöhe des Unterwassers erreicht. Festlegung und sichere Abdichtung des Troges, Öffnen des Unterwassertrog- und Haltungstors. Aus- und Einfahrt der Schiffe.
- ⑤ Der rechte Trog und die Luftleitung fahren nach Schließen der Tore und Entriegelung mit den zu schleusenden Schiffen aufwärts. Aus- und Einfahrt der Schiffe im linken Trog sind beendet, die Tore werden geschlossen.
- ⑥ Der rechte Trog hat das Oberwasser erreicht. Vor Auftauchen wird die Luftleitung festgelegt.
- ⑦ Nach Öffnung der Luftventile wird die Luft durch ein Gebläse aus der Luftkammer des linken Troges in die entsprechenden Lufträume des rechten Troges gedrückt.
- ⑧ Durch den Luftaustausch taucht der rechte Trog nach dem Prinzip der aerostatischen Waage, auf, während der linke Trog gleichzeitig eintaucht.
- ⑨ Wenn der linke Trog mit seiner Oberkante bis zum Wasserspiegel eintaucht, ist der Luftaustausch beendet. Damit hat der linke Trog die Ausgangsstellung für den Tauchvorgang erreicht. Die Betriebsvorgänge wiederholen sich entsprechend den Abschnitten 2—8.

Schließlich hat Rothmund noch der sehr häufig gestellten Forderung Rechnung getragen, statt der im Oberwasser schwimmenden und untertauchenden Tröge eine Lösung zu finden, die mit oben offenem Trog arbeitet und infolgedessen keine Unterwasserfahrt zurückzulegen hat. Der Hauptnachteil dieser Variante besteht neben einer entscheidenden Kostenerhöhung darin, daß die hohen Seitenwände der zum Oberwasser hochgefahrenen Tröge insbesondere durch Winddruck zusätzliche Belastungen erhalten, die in dieser Stellung nur sehr schwierig aufgenommen werden können. Rothmund kam selbst zu der Feststellung, daß der Entwurfsvorschlag der im Unterwasser schwimmenden offenen Tröge auf niedrige Gefällsstufen beschränkt bleiben muß. Im Rahmen dieses Beitrags wird daher nur die von Rothmund ursprünglich vorgeschlagene Lösung der im Oberwasser schwimmenden geschlossenen Tröge diskutiert; sie hat den großen Vorzug, daß sie mit verhältnismäßig einfachen Mitteln auszuführen ist. Sie bedient sich für den Gewichtsausgleich eines einwandfrei anzuwendenden physikalischen Prinzips und erreicht dadurch eine recht wirtschaftliche Lösung.

### 2.3 Einwendung und Kritik

Gegen die Vorschläge von Rothmund sind eine Reihe von Bedenken und Einwendungen erhoben worden [21], [22], [23]. U. a. beschäftigt sich die Kritik mit der Sicherheit im Betrieb, mit der Unterhaltung und Wartung der Anlagen, mit der Betriebsführung sowie mit Fragen der Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit von Tauchschleusen. Besonders ernst zu nehmen sind hierbei alle Forderungen, die die Sicherheit eines Unterwasser-trogtes im Betrieb einer Tauchschleuse betreffen.

Grundsätzlich kann zunächst festgestellt werden, daß die Verwendung geschlossener im Oberwasser schwimmender Tröge die günstigste Einsatzmöglichkeit darstellt, da diese in ihrer ganzen Ausdehnung gleichmäßig unterstützt sind. Hierdurch ist, wie bereits ausgeführt wurde, ein weitgehender unmittelbarer Ausgleich zwischen Last und Auftrieb möglich. Es werden daher Lastkonzentrationen vermieden, die bei den übrigen Hebewerksbauweisen zu schweren Tragkonstruktionen führen.

Selbstverständlich besteht die Möglichkeit, all die Sicherungsmaßnahmen, die sich bisher im Hebewerksbetrieb insbesondere bei Schwimmerhebewerken bewährt haben, auch bei Tauchschleusen vorzusehen, z. B. Sicherung der Trogführung und Abfangen der Last durch Spindeln oder Zahnstockleitern in Verbindung mit Selbstsperrung oder Drehriegel. Derartige Maßnahmen widersprechen jedoch der Eigenart eines schwimmenden Trogkörpers, sie nehmen ihm die natürliche Sicherheit, die er in diesem Zustand besitzt. Aus diesem Grunde muß die Sicherung des Betriebs von Tauchschleusen der Eigenart ihrer Bauweise angepaßt werden.

Das gilt gleichfalls für die Berücksichtigung der Katastrophenfälle. Die Auswirkung von Schäden und Unregelmäßigkeiten im Betriebsablauf kann z. B. bei den bisher angewandten Bauweisen zu Katastrophen führen, während sie bei einem schwimmenden Trogkörper durchaus nicht die Sicherheit zu gefährden braucht. Selbstverständlich muß für alle Teile der Bauanlage und für ihre einzelnen Funktionen im Betriebsablauf volle Sicherheit gewährleistet sein.

Es wird bedauert, daß mit Rücksicht auf die Beschränkung des Umfangs nicht auf weitere Einzelheiten der Kritik eingegangen werden kann. In Abs. 3 wurden einige dieser Probleme gestreift. Weiterhin darf auf das recht umfangreiche Schrifttum hierzu hingewiesen werden.

### 3. Neue Vorschläge für die Weiterentwicklung von Tauchschleusen

Als Inhaber des Lehrstuhls für Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau, dem Rothmund von 1920 bis 1948, d. h. nahezu 29 Jahre vorstand, lag es nahe, daß sich der Verfasser u. a. auch mit der Ausführung von Tauchschleusen nach dem Prinzip der aerostatischen Waage befaßte. Mit Rücksicht darauf, daß über aussichtsreich erscheinende technische Entwicklungen in Fachkreisen Klarheit bestehen sollte, hat sich der Verfasser die Aufgabe gestellt, diese Klärung unter möglichst weitgehender Berücksichtigung der mannigfachen kritischen Einwendungen herbeizuführen [24]. In diesem Beitrag sollen einige Vorschläge zur Weiterentwicklung der Rothmundschen Tauchschleuse bekanntgegeben werden (Bild 22). Über die Ergebnisse von Modellversuchen wird rechtzeitig zum XXI. Internationalen Schiffahrtskongreß berichtet (s. Bild 23).

Im Prinzip wurden Anlage und Betrieb der Tauchschleuse nach der Bauweise Rothmund beibehalten. Geändert wurde im wesentlichen die Luftzuführung mit dem recht komplizierten Luftleitungssystem, der Antrieb und einige Maßnahmen zur Katastrophensicherung.

#### 3.1 Luftzuführung

Nach dem neuen Vorschlag erfolgt die Luftzuführung über einen gemeinsamen Leitungswagen, der mit Rohrleitung und sämtlichen Armaturen jeweils nach beendigtem Luftaustausch von dem abwärts tauchenden Trogkörper in die untere Endstellung mitgenommen wird. Während des Luftaustausches (Ein- und Austausch der Tröge) befindet sich der Leitungswagen in der oberen Endstellung und zwar mit seinen geöffneten Ventilen etwa 30 cm über dem konstanten Druckwasserspiegel der Luftkammer. Infolge der kinetischen Energie des austauchenden Troges kommt der Luftaustausch sofort in Gang. Er soll durch ein im Leitungswagen angeordnetes Gebläse unterstützt und damit beschleunigt werden. Durch den Einsatz des Gebläses kann das Anziehen der Windwerke entfallen. Nach Überleiten der Pendelluft werden die Ventile geschlossen.

Damit die geöffneten Ventile der Luftleitung bereits bei beginnendem Austausch des Troges mit Sicherheit über dem Druckwasserspiegel liegen, ist in der Mitte der beiden Luftkammern eine domartige Vertiefung vorgesehen. Diese Aussparung wird stets mit Luft gefüllt sein, die beim Abtauchen komprimiert wird. Für den Vorgang des Austauschs ist lediglich der Beginn des Luftaustausches kritisch, wenn sich das Wasser von der inneren Begrenzungsfläche der Luftkammer ablöst. Es muß sichergestellt sein, daß die Druckluft den entstehenden Hohlraum in ganzer Länge und in kürzester Zeit ausfüllt. Das ist jedoch bei dem von Rothmund gewählten Luftkammerquerschnitt schwierig, da auf der Strecke vom Beginn der Luftzuführung bis zum Ende der Luftkammer zunächst kein Strömungsquerschnitt frei ist. Aus diesem Grunde wurde ein Längskanal angeordnet, der gleichfalls durch Luft stets von Wasser freigehalten wird. Damit dürfte dann sofort zu Beginn des Luftaustausches ausreichend Querschnitt zur Längsverteilung der Luft zur Verfügung stehen.

#### 3.2 Antrieb und Führung

Die Antriebsaggregate werden im Gegensatz zu den bisherigen Vorschlägen von Rothmund im Trogkörper aufgestellt. Der mechanische Gleichlauf soll über ein Wellenviereck erreicht werden. Die Kraftübertragung erfolgt durch Ritzel über Zahnstangen, die an den 4 Führungsgerüsten befestigt sind.

Der Antrieb kann mit etwa  $4 \times 100$  t Hubkraft verhältnismäßig niedrig bemessen werden, da er in erster Linie nur Beschleunigungskräfte für die Ab- und Auffahrt der

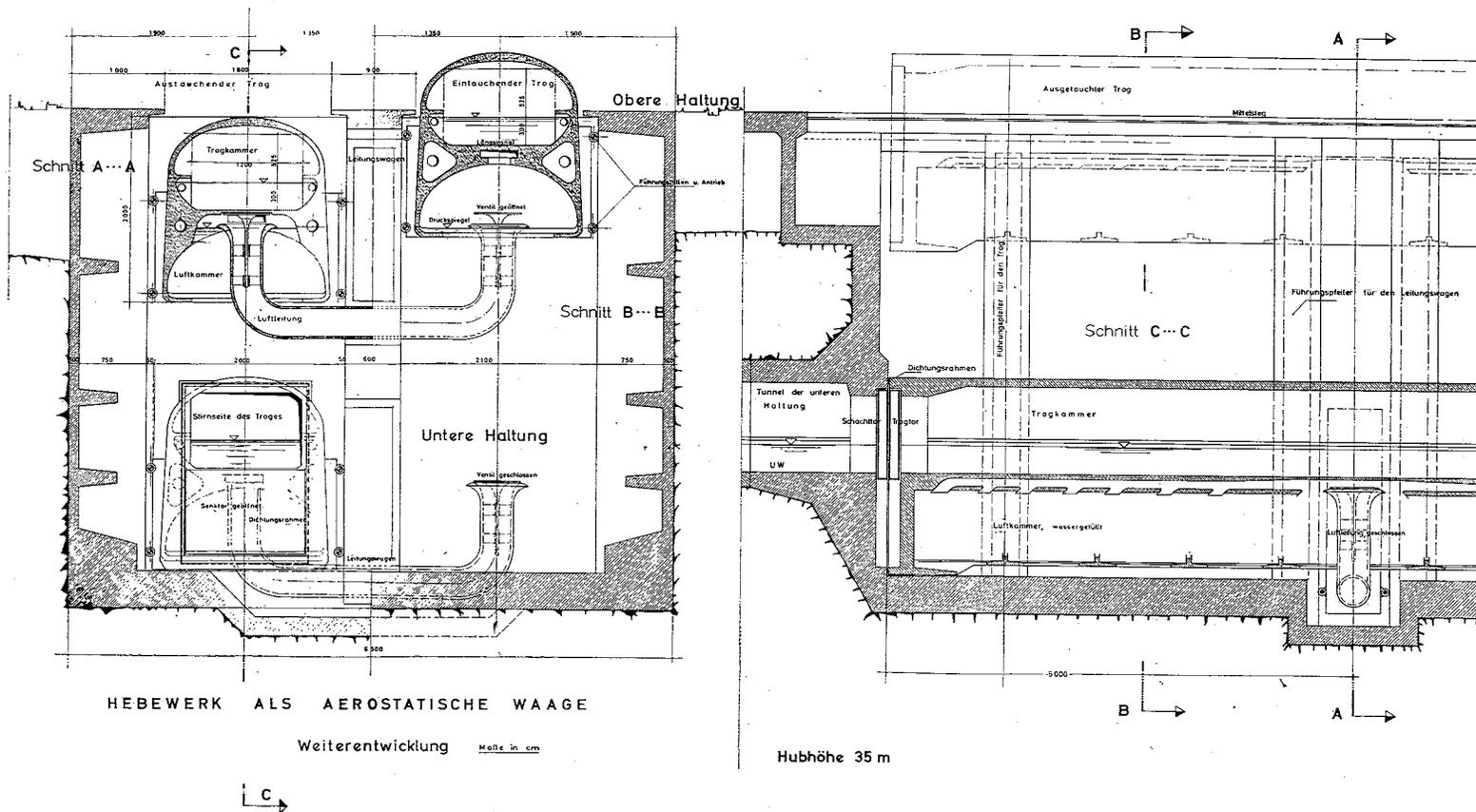


Bild 22  
 Weiterentwicklung der Rothmundschen Tauchschleuse  
 Hebewerk als aerostatische Waage

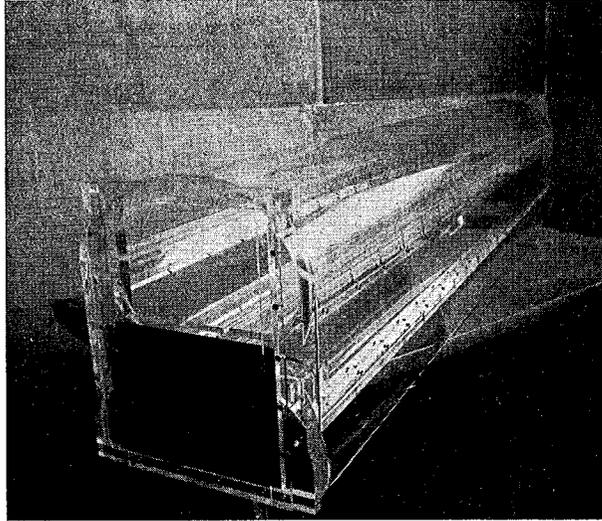


Bild 23  
Foto des Schwimmtroges des Versuchsmodelles

Trogkörper im Tauchbecken aufzubringen hat. Die Sicherung der Horizontallage des Troges soll gleichfalls durch das Wellenviereck erfolgen. Aus diesem Grunde dürfte es zweckmäßig sein, ein zweites Wellenviereck mitlaufen zu lassen, damit bei Ausfall des ersten jeweils eine Katastrophensicherung vorhanden ist.

### 3.3 Sicherungsmaßnahmen in Katastrophenfällen

Im wesentlichen werden folgende Katastrophenfälle zu berücksichtigen sein:

1. Wassereintritt in den Trog,
2. Entweichen der Luft aus der Luftkammer in der oberen Endstellung des Troges,
3. Ausfließen des Schachtwassers,
4. Ausfallen des Antriebs.

#### Zu 1.: Wassereintritt in den Trog

Bei einem Wassereintritt in den Trog ist abgesehen von örtlich auftretenden Erschwernissen zunächst die Gleichgewichtslage durch örtliche Wasserüberlast gefährdet. Diese Auswirkung soll dadurch ausgeschaltet werden, daß unmittelbar über dem Trogwasserspiegel Überlauföffnungen angeordnet werden, durch die das Leckwasser in Kammern abfließt, aus denen es automatisch zurückgepumpt werden kann. Übersteigt der Wassereintritt die Kapazität der Pumpen, so bewegt sich der Trog infolge seines zunehmenden Übergewichtes langsam in die untere Endstellung. Die Schiffsbesatzung wird diese Fahrt entweder ungefährdet in einem luft- und wassersicheren Raum des Trogkörpers (Taucherglocke) mitmachen oder bei größeren Höhen mit Hilfe einer Druckzelle zur Wasseroberfläche auftauchen. Falls der Trogkörper bis zur Ausspiegelung des Trog-

wassers mit dem Unterwasserspiegel abgesenkt werden kann, besteht die Möglichkeit, daß sich die Schiffsbesatzung durch das untere Trog- und Haltungstor in Sicherheit bringen kann. Ferner ist bei diesem Katastrophenfall zu fordern, daß die Horizontallage des Troges erhalten bleibt. Das kann durch eine entsprechende Bemessung der Gleichlaufwellen geschehen.

#### Zu 2.: Entweichen der Luft aus der Luftkammer in der oberen Endstellung des Troges

Wenn die Luft aus der Luftkammer durch eine plötzlich auftretende Undichtigkeit entweicht, muß die Ein- bzw. Ausfahrt beschleunigt beendet werden, damit die Trogtore geschlossen werden können.

Anschließend taucht der Trogkörper ein, er kann nach Luftausgleich im Schwebезustand an die untere Haltung fahren, wie im normalen Betriebsfall. Eine unmittelbare Gefahr besteht daher lediglich für die Zeit der Aus- und Einfahrt.

Man könnte die Aus- und Einfahrt der Schiffe durch Arretierung des Trogkörpers sichern. Dann müßte man jedoch die erheblichen Vorteile der freien Führung in der oberen Endstellung aufgeben. Daher sollte man vielmehr versuchen, den Schaden durch Unterteilung der Luftkammer in verschiedene Abschnitte zu lokalisieren und dadurch das Absinken des Troges soweit zu beschränken, daß dieser Katastrophenfall selbst dann ungefährlich ist, wenn er im Augenblick der Aus- oder Einfahrt eines Schiffes auftritt.

#### Zu 3.: Ausfließen des Schachtwassers

Die freie Trogführung in der oberen Endstellung hat den großen Vorteil, daß sie der schwimmenden Auflagerung des Troges entspricht. Infolgedessen wird sich der Trog unabhängig von Hebungen oder Senkungen des oberen Wasserspiegels sofort wieder auf seine Sollage einspielen. Wenn der Schacht infolge eines Katastrophenfalls auslaufen sollte, fährt der Trog an die untere Haltung, indem er auf dem sinkenden Schachtwasserspiegel schwimmt und an den Führungsgerüsten geführt wird. Ein zum Zeitpunkt des Katastrophenbeginns einfahrendes Schiff kann die Einfahrt ungefährdet fortsetzen, da es mit dem Trog auf gleicher Höhe verbleibt. Hierbei ist allerdings vorauszusetzen, daß das obere Sicherheitstor zum Abschluß der oberen Haltung bei Eintreten des Katastrophenfalles geschlossen wird und die Übergangsstrecke bis zum Tauchschaft die erforderliche Tauchtiefe besitzt. Im übrigen kann dieser Katastrophenfall auch bei jeder Schleuse auftreten. Besondere Sicherungsmaßnahmen wurden hier bisher nicht gefordert.

#### Zu 4.: Ausfallen des Antriebs

##### Während der Unterwasserfahrt

Fällt während der Unterwasserfahrt der Antrieb eines Troges aus, so kann der Trog in jedem Falle durch Aufnahme einer entsprechenden Menge Ballastwasser die untere Haltung erreichen.

##### Während des Aus- bzw. Eintauchvorganges

Während des Aus- und Eintauchvorganges sind die beiden Tröge voneinander abhängig. Fällt der Antrieb eines Troges aus, so kann er durch den Antrieb des anderen ersetzt werden. Ebenso kann der betroffene Trog durch Aufnahme oder Abgabe von Wasser die gewünschte Endstellung erreichen.

Es ist daher festzustellen, daß von den 4 diskutierten Katastrophenfällen das Ausfließen des Schachtwassers oder ein Ausfallen des Antriebs keine wesentlichen Auswirkungen für die Sicherheit von Schiff und Mannschaft haben werden. Dagegen müssen für die Katastrophenfälle eines Wassereintruchs und des Entweichens von Luft unbedingt Sicherungsmaßnahmen getroffen werden. Die dabei im einzelnen auftretenden Probleme werden durch Versuche überprüft.

#### *Schriftumsverzeichnis*

- [1] Illiger, J.: Der Bau eines neuen Schiffshebewerkes bei Henrichenburg. Bau und Bauindustrie 1959, 2. August-Heft, S. 422.
- [2] Illiger, J.: Ein neues Schiffshebewerk bei Henrichenburg. Die Bautechnik 1959, Heft 9, S. 329.
- [3] Dr.-Ing. Wickert, G.: Schwimmer als Gewichtsausgleich für Schiffshebewerke. Bauingenieur 1959, Heft 9, S. 342.
- [4] Illiger, J.: Dritter Abstieg bei Schleuse Henrichenburg. Zeitschrift für Binnenschiffahrt 1959, S. 310.
- [5] Roloff, H. J.: Die Tiefbau- und Stahlbauarbeiten für das Schiffshebewerk Henrichenburg in Waltrop. VDI-Zeitschrift 1961, Nr. 31, S. 1545.
- [6] Schulz, H.: Bauliche Durchbildung der Schwimmer des Schiffshebewerkes Henrichenburg. Schweißen und Schneiden 1961, Heft 9, S. 396.
- [7] Illiger, J. und Braun, H. G.: Schiffshebewerk Henrichenburg in Waltrop. Der Tiefbau 1962, Heft 10, S. 671.
- [8] Prof. Dr.-Ing. Steinhardt, O. und Valtinat, G.: Modelluntersuchungen zur Bestimmung der Schweißnähtenspannungen in der Schwimmeranschlußkonstruktion beim Schiffshebewerk Henrichenburg. Bauingenieur 1963, Heft 5, S. 190.
- [9] Illiger, J.: Das Schiffshebewerk Henrichenburg in Waltrop. Hansa 1963, H. 9, S. 907.
- [10] Illiger, J.: Der Stahlbau des neuen Schiffshebewerkes Henrichenburg in Waltrop. Der Stahlbau 1963, H. 11, S. 321.
- [11] [12] [13] Berichte zum IX., XVII. und XIX. Internationalen Schiffahrtskongreß.
- [14] Deutsche Berichte zum Internationalen Schiffahrtskongreß, London 1957. Bonn 1957, Bundesverkehrsministerium, S. 82.
- [15] Konz, O.: Donau-Bodensee-Kanal, Ulm—Friedrichshafen. Stuttgart 1950.
- [16] Konz, O.: Neckar-Donau-Kanal, Plochingen—Ulm. Stuttgart 1954.
- [17] Faure, B.: Schwimmerhebewerke, Bauarten Faure, Bautechnik 30 (1953) Nr. 3.
- [18] Zusammenfassender Bericht der Arbeitsgemeinschaft von 6 Stahlwasserbaufirmen für das Schiffshebewerk Henrichenburg (III) 1957. (Unveröffentlicht.)
- [19] Simon: Über die Gestaltung von Schiffshebewerken. Mitt. der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau. Franzius-Institut der TH Hannover, Heft 11.
- [20] Rothmund, L.: Die Rothmundsche Tauchschleuse. Vereinigung von Freunden der T. H. Stuttgart. Stuttgart 1955.
- [21] Gutachten der Akademie des Bauwesens vom 23. 5. 1938 über die Tauchschleuse Bauweise Rothmund. (Unveröffentlicht.)
- [22] Hampe, Br.: Tauchschleuse oder Hebewerk. Bautechnik 29 (1952) Heft 4.
- [23] Rothmund, L.: Die Rothmundsche Tauchschleuse, ein neues Gleichgewichtshebewerk für hohe und niedere Gefällstufen. Bautechnik 32 (1955) Heft 2.
- [24] Röhnisch, A.: Bau von Hebewerken, Entwicklungsrichtungen. VDI-Zeitschrift Bd. 102 (1960) Nr. 16.