

## **Abteilung I**

### **Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen**

(für gewerbliche und Freizeitschifffahrt)

#### **Thema 2**

Neuerungen bei Gestaltung, Konstruktionsmethoden und Betrieb von wasserbaulichen Anlagen für die Regulierung und für die Überwindung von Höhenunterschieden, wobei besonders auf neue Materialien, Konstruktionsmethoden sowie den zunehmenden Einsatz der Elektronik bei den Betriebssystemen hingewiesen werden sollte

#### **Thema des Berichts**

Teil 1: Entwicklungen beim Schiffshebewerk Lüneburg am Elbe-Seitenkanal

Teil 2: Entwicklungen bei den Sparschleusen der Main-Donau-Verbindung

Teil 3: Wehrverschlüsse als Zugsegmente mit oberwasserseitigen öldruckhydraulischen Antrieben

Teil 4: Funktionserweiternde Einrichtungen für Schleusenobertore.

#### **Berichtersteller:**

Federführung: Präsident a.D. H.G. Braun, früher Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte, Hannover

Teil 1: Präsident a.D. H.G. Braun, früher Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte, Hannover

Baudirektor D. Feske, Wasser- und Schifffahrtsamt Uelzen  
Dipl.-Ing. H. Jensch, Germanischer Lloyd, Hamburg

Teil 2: Dipl.-Ing. W. Feile und Dipl.-Ing G. Chara, Rhein-Main-Donau AG, München

Teil 3: Baudirektor H. Donau, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Mainz  
Bauoberrat S. Lasar, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Teil 4: Bauoberrat S. Lasar und Dipl.-Ing. B. Kemnitz, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Baudirektor H. Donau, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Mainz

## Inhalt

### Teil 1

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Allgemeines .....   | 37 |
| 2.    | Beschreibung des Schiffshebewerkes Lüneburg .....             | 38 |
| 3.    | Neue Entwicklungen .....                                      | 40 |
| 3.1   | Architektur .....   | 40 |
| 3.2   | Trog mit Stützrahmen und Trogantrieb .....                    | 41 |
| 3.2.1 | Abmessungen und Lastfälle .....                               | 41 |
| 3.2.2 | Trog und Stützrahmen .....                                    | 42 |
| 3.2.3 | Trogantriebe mit Umrichter und Meß-/Überwachungsanlagen ..... | 42 |
| 3.3   | Feuererkennung und -bekämpfung .....                          | 46 |

### Teil 2

|     |                                     |    |
|-----|-------------------------------------|----|
| 1.  | Einführung .....                    | 46 |
| 2.  | Entwicklungen .....                 | 47 |
| 2.1 | in der Konstruktion .....           | 47 |
| 2.2 | im Bereich der Hydraulik .....      | 51 |
| 2.3 | bei den Berechnungsgrundlagen ..... | 54 |
| 3.  | Schlußbetrachtung .....             | 56 |

### Teil 3

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Wehrverschlüsse als Zugsegmente mit oberwasserseitigen<br>ölhydraulischen Antrieben .....                           | 56 |
| 2. | Konstruktive und hydraulische Maßnahmen zur Vermeidung<br>von Ablagerungen unter Fischbauchklappen von Wehren ..... | 58 |

### Teil 4

|    |                       |    |
|----|-----------------------|----|
| 1. | Drucksegmenttor ..... | 60 |
| 2. | Hubsenktor .....      | 63 |

|                              |  |    |
|------------------------------|--|----|
| Schrifttumsverzeichnis ..... |  | 65 |
|------------------------------|--|----|

## Zusammenfassung

### Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland sind in den letzten Jahren beim Neu- und Ausbau der Wasserstraßen, vor allem am Elbe-Seitenkanal (ESK), an der Main-Donau-Verbindung (MDV) und der Saar Bauwerke zur Überwindung großer Fallhöhen geplant und errichtet worden. Bei dem Doppel-Schiffshebewerk Lüneburg am ESK, den Schleusen der MDV und den Schleusen und Wehren für die Stauregelung der Saar haben der allgemeine technische und wissenschaftliche Fortschritt, Erkenntnisse aus dem Betrieb der Anlage selbst (Schiffshebe-

werk) oder ähnlicher, bereits fertiggestellter Anlagen (Schleusen der MDV) sowie das Streben nach technisch und wirtschaftlich günstigen Lösungen bemerkenswerte Entwicklungen zum Tragen gebracht. Sie betreffen die Gesamtkonzeption der Bauwerke (Schiffshebewerk und Schleusen der MDV) oder die Ausbildung von Teilobjekten (Wehrverschlüsse und Schleusenobertore an der Saar). Die Entwurfgrundlagen sind aus Betriebserfahrungen, Natur- und Modellversuchen sowie mathematischen Berechnungen gewonnen worden.

### Zu Teil 1

Die an deutschen Wasserstraßen vorhandenen Schiffshebewerke unterscheiden sich in wesentlichen Punkten [2]. Einerseits ist dies zurückzuführen auf die

|   |                         |
|---|-------------------------|
| — Zeit der Inbetriebnahme:  | 1899—1975               |
| — Trogabmessungen und das dadurch bedingte Gewicht der bewegten Teile einschl. Wasserfüllung: | 3.100 Mp—12.000 Mp      |
| — Hubhöhe:  | 14,5 m—38,0 m           |
| — Art des Gewichtsausgleichs:   | Schwimmer/Gegengewichte |

Wenn auch die Konstruktions-, Bau- und Betriebserfahrungen jedes Bauwerks für die nächstfolgende Anlage zur Verfügung standen, war andererseits deren Berücksichtigung nur im begrenzten Umfang möglich, weil sich die Technik zwischenzeitlich weiterentwickelt hat und die jeweiligen Entwurfsbedingungen z.T. völlig neue Überlegungen erforderten. Auch der Wettbewerb der Anbieter hat die Konzeption neuer Anlagen oder einzelner Komponenten stark beeinflusst. So stellen die vorhandenen Bauwerke einmalige Ausführungen dar, die dem jeweils neuesten Stand der Technik entsprechen.

Ein weiteres besonderes Merkmal der Schiffshebewerke ist deren Komplexität. Viele Anlagenteile sind im Betrieb voneinander abhängig. Da auch zahlreiche äußere Einflüsse auf das gesamte Bauwerk einwirken, muß ein einwandfreies Zusammenspiel aller Elemente gewährleistet sein, wobei sich die Anforderungen mit der Größe der Anlage steigern.

Diese Umstände treffen auf das Doppel-Schiffshebewerk Lüneburg im besonderen Maße zu. Sie bedingen eine genaue Erfassung und Auswertung einer Vielzahl von Daten über äußere Einwirkungen, Betriebsabläufe und Zustand der Anlagenteile sowie eine sorgfältige Überwachung des Betriebes mit den notwendigen Sicherungen gegen unzulässige Beanspruchungen, Bedienungs- und Steuerbefehle u.ä. Dazu bietet sich die moderne Elektronik mit ihren verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten an. Mit den wichtigsten Bauteilen des Hebewerkes, dessen konstruktive Ausbildung wesentlich von den Abmessungen des Bauwerkes bestimmt wird, werden vor allem die Kontroll- und Sicherungsanlagen beschrieben, die auch Erkenntnisse aus den ersten Betriebserfahrungen berücksichtigen.

### Zu Teil 2

Die rund 170 km lange Verbindung von Main und Donau (MDV) wird auf eine Länge von etwa 100 km als Stillwasserkanal ausgeführt. In diesem Bereich werden zur Überwindung der natürlichen Höhenunterschiede wegen unzureichender Wasserzuflüsse ausschließlich Sparschleusen gebaut.

Für die erste Anlage dieser Art, die Sparschleuse Bamberg, wurde ein hydraulisches und bauliches Konzept erstellt, nach welchem, soweit möglich, auch die nachfolgenden Stufen gebaut werden sollten.

Während der langen Bauzeit der MDV haben sich aus dem Bau der einzelnen Stufen, aber auch aus dem Betrieb fertiger Anlagen immer wieder Erkenntnisse ergeben, die zu Änderungen und Anpassungen der nächsten Entwürfe führten.

Ihren Abschluß findet diese Entwicklung nun bei den Schleusen Eckersmühlen und Hilpoltstein, die mit einer Hubhöhe von je 24,67 m zu den drei höchsten Bauwerken in der MDV gehören.

Die wesentlichsten Entwicklungen fanden im Bereich der Tiefbaukonstruktion, im Bereich der Hydraulik und bei den Berechnungsgrundlagen statt.

Sie sind vor allem durch Auswirkungen der regelmäßig in voller Höhe wiederkehrenden Wasserbelastung sowie durch die Belastungen aus instationären Fließvorgängen (bei Nothalt der Verschlussorgane) bestimmt worden. Auch haben Erfahrungen aus dem Betrieb wesentlich dazu beigetragen, Konstruktionen zu entwickeln, die die Standsicherheit und Betriebssicherheit für die vorgesehene Lebensdauer gewährleisten.

### Zu Teil 3

Die hydraulischen und konstruktiven Vorteile des Zugsegmentes als Wehrverschluß sind inzwischen weitgehend anerkannt. Auch setzen sich in zunehmendem Maße ölhydraulische Systeme als Antriebe von Verschlüssen des Stahlwasserbaus durch. Die Kombination des Zugsegmentes mit Nutzung der Vorzüge des hydraulischen Antriebes wurde bisher konsequent nur mittels Torsionsrohr angewandt. Bei den z.Z. im Rahmen des Ausbaus der Saar errichteten Wehren kommt eine Variante des hydraulischen Antriebes von Zugsegmenten zur Anwendung, bei der die Antriebszylinder außen an den Zugarmen angreifen. Die oberen Gegenlager bilden stählerne Lagerböcke, die im Beton von 0,80 m breiten Wandvorlagen verankert sind. Diese Antriebsart ist einfacher als mit Torsionsrohr und ermöglicht die Ausführung schmalerer Wehrpfeiler, so daß sie insgesamt als technisch und wirtschaftlich günstige Lösung anzusehen ist.

Bei Wehren mit Fischbauchklappen als alleinige Verschlüsse (Klappenwehre) führen Ablagerungen im Raum unter der Klappe zu folgenden besonders häufig auftretenden Problemen:

- Bei geringen Fallhöhen läßt sich die Klappe bei Hochwasser nicht vollkommen legen.
- Bei größeren Fallhöhen verbleiben die Steine im Raum zwischen Überfallstrahl und Wehrrücken und bewirken eine so starke mechanische Beanspruchung des Betons, daß die Oberfläche zerstört und die Bewehrung freigelegt wird.

Es wird beschrieben, wie es mit Hilfe hydraulischer Modellversuche gelang, den Überfallstrahl und die durch Teilimpulse bewegten Feststoffe so zu führen, daß der Raum unter der Klappe in kurzer Zeit wieder frei wurde. Hierzu mußten auch die Neigung des Wehrrückens und die Tosbeckentiefe aufeinander abgestimmt werden.

#### Zu Teil 4

Segmentverschlüsse und Hubsenktoore sind seit langem bewährte Verschlößorgane des Stahlwasserbaus; die einen kommen überwiegend bei Stauanlagen, die anderen als Obertore von Schleusen zur Anwendung.

Durch geeignete bauliche Durchbildung dieser Verschlößsysteme und der hiermit bezüglich der hydraulischen Wirksamkeit unmittelbar zusammenhängenden Massivbauteile kann eine wesentliche Funktionserweiterung der Schleusenobertore erreicht werden. Hierzu gehört beim Drucksegment die kombinierte Nutzung zum Füllen der Kammer und als Absperrorgan bei Hochwasserableitung durch die Schleuse. Die Weiterentwicklung des Hubsenktoores als Füllorgan in Verbindung mit einem Grundkanal-Füllsystem ermöglicht auch bei 190 m langen Schleusenkammern die reine Torfüllung.

Die auftretenden Strömungsvorgänge und hydrodynamischen Belastungen sind rein rechnerisch nur unzureichend zu erfassen. Deshalb kann zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens der Stahlkonstruktion und zur Ermittlung der auftretenden Kräfte sowie zur Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit des Gesamtsystems auf Modellversuche nicht verzichtet werden. Nur sie ermöglichen die Optimierung der Konstruktion und bieten somit Gewähr für die einwandfreie Funktion. Die Ergebnisse der Modellversuche werden durch Messungen am ausgeführten Bauwerk unter Betriebsbedingungen überprüft.

Falls die sonstigen Voraussetzungen gegeben sind, ermöglichen die behandelten Funktionserweiterungen der Obertore u.a. den Verzicht auf aufwendige Füllsysteme mit oberwasserseitigen Längskanalverschlüssen und Einlaufbauwerk. Die Möglichkeit der Hochwasserableitung durch die Schleuse kann bei der hydraulischen Bemessung des Wehres berücksichtigt werden, was zu wirtschaftlicherer Bauweise führt.

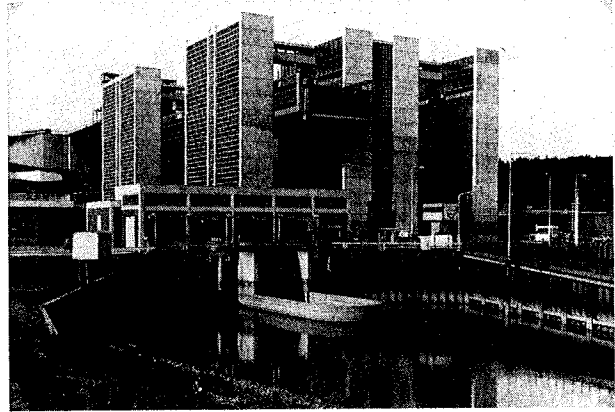
### Teil 1

#### Entwicklungen beim Schiffshebewerk Lüneburg am Elbe-Seitenkanal

##### 1. Allgemeines

Im Zuge des 115 km langen Elbe-Seitenkanals vom Mittellandkanal zur Elbe wird ein Höhenunterschied von 61 m überwunden, davon 38 m beim Doppel-Schiffshebewerk Lüneburg (Abb. 1) und 23 m bei der Schleuse Uelzen [5]. Während in den beiden oberen Kanalhaltungen normale betriebsbedingte Wasserspiegelschwankungen auftreten, sind in der Mündungsstrecke, d.h. im Unterwasser des Schiffshebewerkes Lüneburg, Wasserstandsänderungen bis 4 m in Abhängigkeit von den Wasserständen der Elbe zu berücksichtigen. Das Abstiegsbauwerk Lüneburg mit der größten Fallhöhe von 38 m wurde nach einem Ideenwettbewerb in den Jahren 1969—1975 gebaut; die Ergebnisse des Ideenwettbewerbes sind ausführlich in [1] beschrieben.

Nach eingehenden Untersuchungen wurde aus technischen und wirtschaftlichen Gründen und wegen des erwarteten Verkehrsaufkommens ein Doppel-Senkrechtbewerk mit Gegengewichten gewählt mit der Forderung, daß beide Anlagen unabhängig voneinander gefahren



**Abb. 1: Doppel-Schiffshebewerk Lüneburg mit Pumpwerk**

werden. Das Schiffshebewerk Lüneburg setzt die Reihe der Senkrechthebewerke an deutschen Wasserstraßen [2] fort:

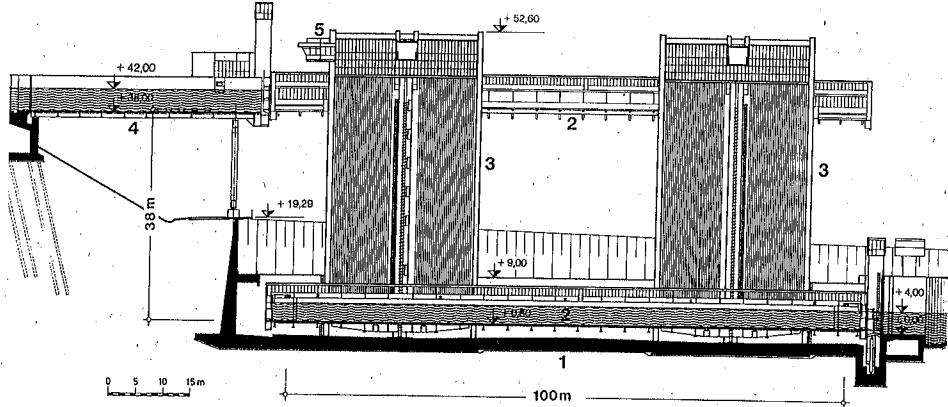
- 1899 5-Schwimmerhebewerk Henrichenburg, Fallhöhe 14,50 m  
Dortmund-Ems-Kanal
- 1934 Gegengewichtshebewerk Niederfinow, Fallhöhe 37 m  
Hohenzollern-Kanal
- 1938 2-Schwimmerhebewerk Rothensee, Fallhöhe 18,70 m  
Mittellandkanal
- 1962 2-Schwimmerhebewerk Henrichenburg, Fallhöhe 14,50 m  
Dortmund-Ems-Kanal
- 1975 Doppel-Gegengewichtshebewerk Lüneburg, Fallhöhe 38 m  
Elbe-Seitenkanal

Hieraus ist zu erkennen, daß bei niedrigeren Fallhöhen Schwimmer und bei größeren Fallhöhen Gegengewichte ausgeführt wurden.

Letztere Bauart erfordert ein höheres Gewicht der bewegten Teile. Das Verhältnis vom Gewicht der Stahlkonstruktion des Troges einschl. Stützkonstruktion zum Gewicht der Wasserfüllung ist bei den Hebewerken aus neuerer Zeit trotz größerer Abmessungen des Troges durch die konstruktive Ausbildung des Troges und dessen Lagerung sowie durch höhere Ausnutzung des Materials kleiner geworden.

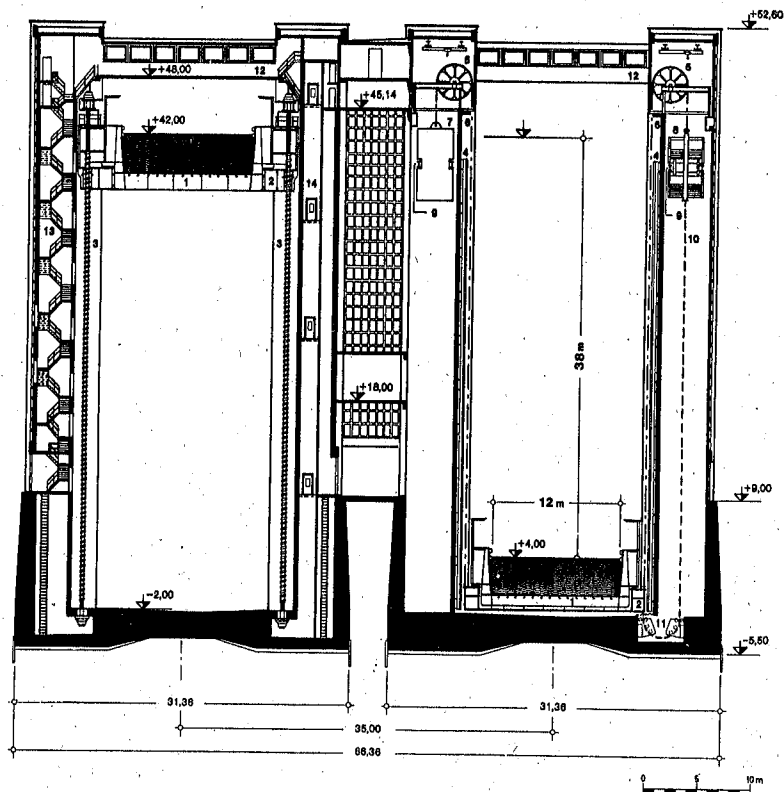
## **2. Beschreibung des Doppel-Schiffshebewerkes Lüneburg**

Jedes der beiden Hebewerke besteht aus folgenden wesentlichen Bauwerksteilen (Abb. 1, 2 und 3):



1 Trogwanne 2 Trog 3 Führungstürme 4 Kanalbrücke 5 Zentralsteuerstand

Abb. 2: Längsschnitt Schiffshebewerk



1 Trog  
 2 Stützrahmen  
 3 Spindel  
 4 Zahnstange  
 5 Seilscheibe  
 6 Gegengewichtsseil  
 7 Gegengewicht  
 8 Tariergewicht  
 9 Gegengewichtsfangrahmen  
 10 Seilgewichtsausgleichkette  
 11 Seilkettenumlenkung  
 12 Verbindungssteg  
 13 Treppenhaus  
 14 Fahrstuhlschacht

Abb. 3: Querschnitt Schiffshebewerk

- flachgegründete, wasserdichte Trogwanne aus Stahlbeton
- 4 flachgegründete Stahlbetontürme zur Aufnahme der Seilscheibenkonstruktion, der Gegengewichte sowie der Führungsbahnen für die beiden Stützrahmen des Troges
- 2 Stützrahmen im Bereich der Führungstürme zur Auflagerung des Troges auf je 4 Lagerpunkten, zur Befestigung der Gegengewichtsseile und zur Aufnahme der Trogantriebe und der Führungselemente
- Stahlkonstruktion des Troges mit Teleskoprahmen (beweglicher Übergang zum Haltungsabschluß) und Trogtor (Hubtor) an beiden Enden, das beim Öffnen und Schließen an das jeweilige Haltungstor (Hubtor) angekoppelt wird
- oberer Haltungsabschluß, bestehend aus stählerner Kanalbrücke mit Haltungstor und dazugehörigen Türmen für Führung und Antrieb (Pylon)
- unterer Haltungsabschluß mit vertikal beweglichem Schildschütz (zur Anpassung an die wechselnden Wasserstände), Haltungstor und Pylon.

Beide Hebewerke haben gemeinsam

- elektrische Ausrüstung (Umspannungsanlage und Niederspannungsverteilung, Steuerung, Überwachung) auf einer besonderen Bühne zwischen den oberwasserseitigen Führungstürmen. Eine ausreichende räumliche Trennung dieser Anlagenteile für beide Hebewerke wäre zur Sicherung gegen einen Ausfall der Gesamtanlage zweckmäßig
- einen zentralen Steuerstand für die 1-Mann-Bedienung, der sich zwischen den inneren oberwasserseitigen Führungstürmen oberhalb der höchsten Trogstellung befindet. Über Kamera-Monitoreinheiten wird von hier aus die gesamte Anlage — in der Regel vollautomatisch — gefahren und der Schiffsverkehr geregelt und überwacht.

### 3. Neue Entwicklungen

Im folgenden werden entsprechend der Themenstellung nur die Anlagenteile behandelt, die neue Entwicklungen aufzeigen; dabei werden auch Erkenntnisse aus den bisherigen Betriebserfahrungen berücksichtigt.

#### 3.1 Architektur

Der Gesamtentwurf wurde im Rahmen des bereits erwähnten Ideenwettbewerbes von einer Arbeitsgemeinschaft namhafter Firmen der Bundesrepublik Deutschland unter Beteiligung eines Architekten aufgestellt. Die Entwurfsverfasser haben das Charakteristische eines Senkrechthebewerkes in eine klare, gut überschaubare und einprägsame Form — relativ leichte und aufgelöste Turmgruppen, zwischen denen sich die Tröge auf- und abbewegen — gebracht. Die Vielzahl der technisch notwendigen Einzelteile ist in wenige Hauptbauteile zusammengefaßt und harmonisch aufeinander abgestimmt; das führt zu einer geordneten Baumasse, die trotz ihrer Größe wenig störend in ihrer Umgebung wirkt (Abb. 1).

Die jeweils 4 Führungstürme, die insbesondere die Vertikallasten der Türme selbst, des Troges und der Gegengewichte aufnehmen müssen, bestehen aus Stahlbeton und sind nach außen hin transparent. Durch Rasterflächen aus Beton-Wabenfenstern, die der ganzen Baugruppe Leichtigkeit und maßstäbliche Gliederung verleihen, kann der Außenstehende den



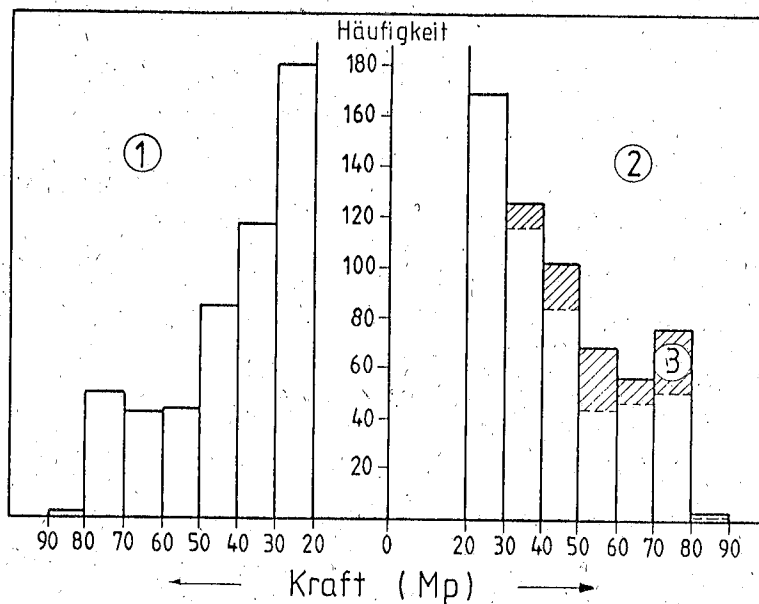
faszinierenden inneren technischen Vorgang verfolgen. Untersuchungen — bereits im Angebotsstadium — ergaben, daß die Führungstürme in Stahlkonstruktion nicht wirtschaftlicher hätten erstellt werden können als in der ausgeführten Stahlbetonkonstruktion in Kletterschalungsbauweise.

Die beiden Tröge und die Kanalbrücken bestehen aus Stahlkonstruktionen, die durch ihre horizontale Gliederung und ihre Farbgebung in gewünschtem Kontrast stehen zu den vertikalen hellen Stahlbetontürmen.

### 3.2 Trog mit Stützrahmen und Trogantrieb

#### 3.2.1 Abmessungen und Lastfälle

Die nutzbaren Abmessungen des Troges zwischen den Stoßschutzeinrichtungen betragen: Länge 100 m, Breite 12 m. Das Gewicht des Troges ergibt sich bei einer Regelwassertiefe von 3,5 m zu ca. 6000 Mp und wird durch Gegengewichte vollständig ausgeglichen. Ursprünglich waren im normalen Betriebsfall nach DIN 19 704 die einzelnen Bauteile auf eine statische



**Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der Ritzelumfangskräfte bei geöffnetem OW-Tor pro 100 Toröffnungen**  
(Auswertung nach Spitzenwertverfahren DIN 45667)

- (1) Bei ein- und auslaufenden Schiffen
- (2) Bei ein- und auslaufenden Schiffen und Überlagerung durch Schleusungswelle
- (3) Einfluß Schleusungswelle

Wasserlast im Trog von  $3,5 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$  bemessen [1], [4]; die Wasserfüllung von  $\pm 0,10 \text{ m}$  entspricht für jeden Antrieb einer Belastung von  $\pm 35 \text{ Mp}$ .

Der Betrieb hat jedoch gezeigt, daß bei angelegtem Trog und geöffnetem Tor durch die Schleusungswelle der ca. 45 km entfernt liegenden Schleuse Uelzen sowie durch die Schwall- und Sunkwellen der ein- und ausfahrenden Schiffe im Trog für den normalen Betriebsfall Wasserstandsänderungen bis zu  $\pm 0,40 \text{ m}$  auftreten. Messungen der Ritzelumfangskräfte unter tatsächlichen Betriebsbedingungen hatten entsprechend hohe Belastungen ergeben (Abb. 4), die den gesamten Trogantrieb einschließlich der Bremsen beanspruchten; ein Teil der bis  $\pm 0,40 \text{ m}$  höheren Wasserlast im Trog wurde vom System Drehriegel/Spindel im Kraftnebenfluß übernommen. Hieraus ergaben sich nach Inbetriebnahme Verstärkungs- und Ergänzungsmaßnahmen an einigen Bauteilen; so war zur Vermeidung einer aus dieser Mehrbelastung resultierenden Überbeanspruchung des Antriebssystems eine auf dem Stützrahmen montierte Haltevorrichtung erforderlich, die diese bei geöffnetem Trog auftretenden Kräfte unmittelbar in die Spindeln abgibt.

Vor Beginn der Trogfahrt wird der Wasserstand im Trog durch Reversierpumpen auf die zulässige Höhe gebracht. Die übrigen Lastfälle sind in [4] beschrieben.

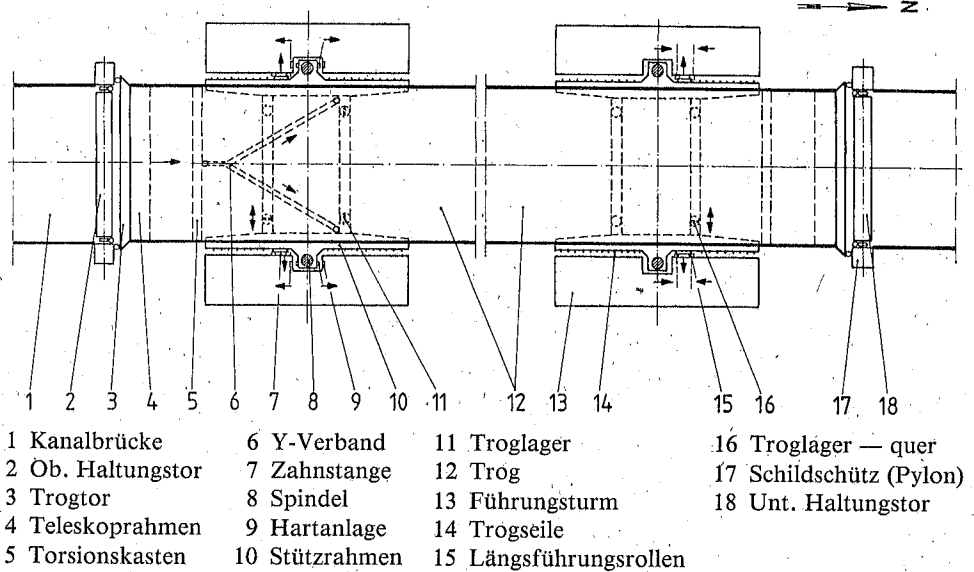
### 3.2.2 Trog und Stützrahmen

Ein Stützrahmen besteht aus 2 Quer- und 2 Längsträgern in kastenförmiger Ausbildung. An den Längsträgern sind die 240 Gegengewichtsseile befestigt. Die Stahlkonstruktion des Troges wird aus 2 Hauptlängsträgern gebildet, die sich zusammensetzen aus den Trogseitenwänden als Stege sowie dem Trogboden und den Laufstegen als Gurte. Die horizontal wirkende, hydrostatische Belastung im Trog wird von U-förmigen Rahmenkonstruktionen in Verbund mit den Längsträgern aufgenommen. Die Vertikallast des Troges wird über je 4 Lager auf beide Stützrahmen abgetragen. Horizontal verschiebbare, hydraulisch angetriebene Teleskoprahmen mit den Trogtoren bilden den Abschluß an beiden Trogenden. Die Dichtungsdetails sind in [4] ausführlich beschrieben.

Die beim Anlegen des Troges an eine Haltung entstehenden Horizontalkräfte werden in einen quer unter dem Trogboden angeordneten Torsionskasten eingeleitet und über einen Y-förmigen Verband mittels gelenkig befestigter Verbindungsglieder in 2 Richtungen in den OW-seitigen Stützrahmen geführt, der sich über Horizontallager in den OW-Führungstürmen abstützt. Aus dem Fahrbetrieb heraus auftretende Horizontalkräfte werden über einstellbare Längsführungsrollen, die an den Stützrahmen befestigt sind, in die Zahnstangenträger an der Führungstürmen geleitet (Abb. 5 und 6). Äußere Horizontalkräfte, die auf die Längsseite des Troges wirken (z.B. Wind, Schiffsstoß), werden über je 1 Lager in die beiden Stützrahmen übernommen und mittels beidseitig auf der Welle des Trogantriebsritzels aufgeschrunpfte Rollen über Ritzelbock, Horizontalzylinder und Ritzelschwinge in die Zahnstangenträger eingeleitet.

### 3.2.3 Trogantriebe mit Umrichter

Die auf den Stützrahmen montierten 4 Antriebe haben die Trägheitskräfte und Reibungswiderstände sowie den nicht durch Gegengewichte ausgeglichenen Anteil der Wasserlast zu überwinden. Die Einzelantriebe bestehen aus einem 160 kW-Drehstromkurzschlußläufermotor, der über eine elastische Kupplung mit angebauter Bremsscheibe ein 3stufiges Stirnradun-



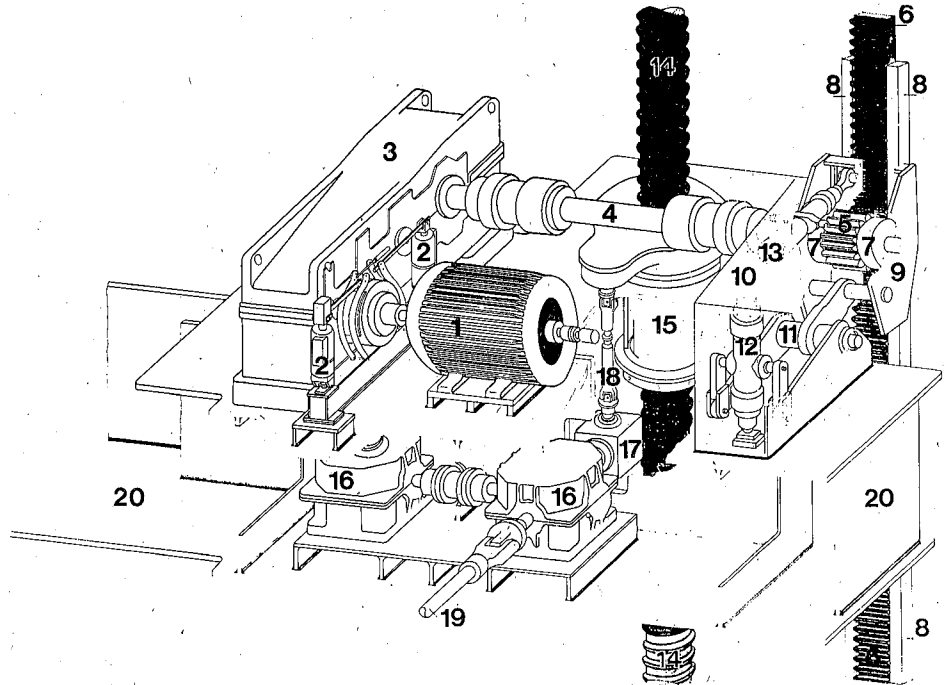
**Abb. 5: Lagerungssystem Trog und Stützrahmen**

tersatzungsgetriebe antreibt (Abb. 6). Eine axial verschiebbare Gelenkwelle stellt die Verbindung zum Trogantriebsritzel her, das in die an den Führungstürmen angeordneten Zahnstangen eingreift. Antriebsritzel und Zahnstangen sind für eine in beiden Richtungen wirkende Umfangskraft von 35 Mp (Dauerbelastung) ausgelegt, können jedoch in besonderem Betriebsfall (Notstop) bis 50 Mp belastet werden (s. Ziff. 3.2.1).

Die während einer Trogfahrt auftretenden Ritzelumfangskräfte betragen im Mittel 15—20 Mp.

Um ein gutes Tragverhalten der ballig geschliffenen Trogantriebsritzel zu gewährleisten, werden diese in einer Ritzelschwinge gelagert, die unten gelenkig an einem kompakt ausgebildeten Gabelhebel und oben an einem pneumatisch-hydraulisch wirkenden Horizontalzylinder mit einem Ritzelbock verbunden ist; dieser ist mit dem Stützrahmen verschraubt. Der Ritzelbock nimmt auch einen am Gabelhebel angelenkten pneumatisch-hydraulisch arbeitenden Vertikalzylinder mit 2 unabhängig wirkenden Dehnungsmeßstreifen-Trägersystemen (DMS) auf. Dieses Meßsystem ermöglicht die Erfassung der nicht ausgeglichenen Lastzustände sowie der Reibungs- und Trägheitskräfte, wobei dessen speziell ausgebildete Lagerung eine Erkennung auch geringer Lastunterschiede gewährleistet. Die elektronisch erfaßten Meßsignale werden zeitgleich bei allen 4 Antriebssystemen mit Datenträgern aufgezeichnet.

Ein weiteres wichtiges Bauteil im Antriebssystem stellt die Bremsenüberwachungsanlage dar. Mittels Dehnungsmeßstreifen wird die Verformung der Bremsbackenhebel in allen 4 Antriebsbereichen zeitgleich erfaßt und elektronisch weiter verarbeitet. Für die Drehmomentvorgabe der Trogantriebe werden Mittelwertsignale des Trogwasserstandes benötigt, die die Trogpegelmeßanlage liefert. Um die bei Wellenbewegung auftretenden unterschiedlichen Wasserstände innerhalb des ganzen Trogbereichs möglichst genau zu erfassen, sind 4 Schwimmeranlagen mit Analoggebern eingebaut.



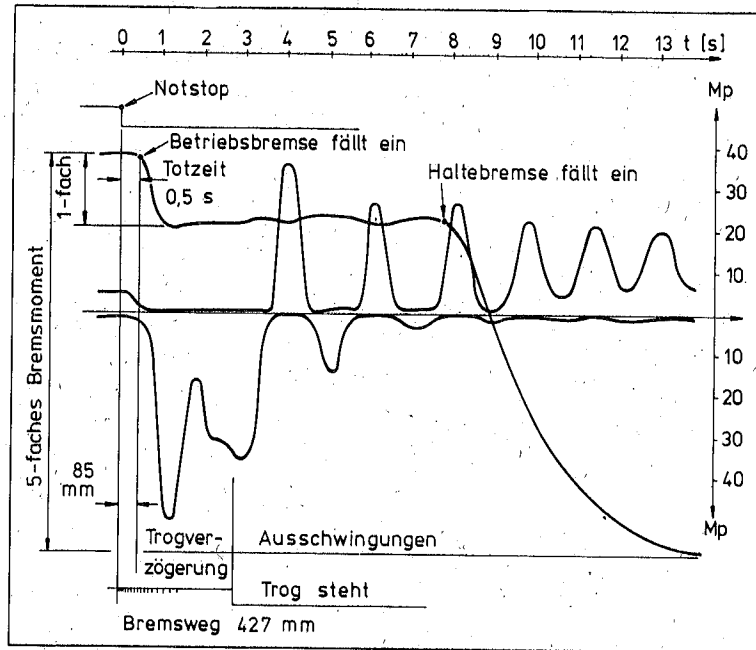
|                                |                     |                    |                     |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1 E-Motor                      | 6 Zahnstange        | 11 Gabelhebel      | 16 Winkeltrieb      |
| 2 Betriebs- und Haltebremse    | 7 Querführungsrolle | 12 Vertikalfeder   | 17 Aufsteckgetriebe |
| 3 Stirnradunteretzungsgetriebe | 8 Führungsschienen  | 13 Horizontalfeder | 18 Gelenkwelle      |
| 4 Demag-Gelenkwelle            | 9 Ritzelschwinge    | 14 Spindel         | 19 Ausgleichswel    |
| 5 Trog-Antriebsritzel          | 10 Ritzelbock       | 15 Drehriegel      | 20 Stützrahmen      |

**Abb. 6: Trograntriebssystem**

Diese vorstehend angeführten elektronisch arbeitenden Meßsysteme liefern Daten über Betriebseinflüsse, die eine genaue Bewertung und Beurteilung der komplexen Betriebsabläufe und von Konstruktionsdaten gestatten, z.B.

- Wasserstände im Trog
- Leistungsaufnahme der 4 Antriebssysteme
- Reibwiderstände während der Trogfahrt
- Belastung des Trograntriebssystems während der Trogfahrt, im angelegten Zustand und bei Notstop
- Feststellung des Gleichgewichtszustandes Trog/Gegengewichte mit Aussage über den Tarierzustand.

Damit stehen auch kontinuierlich Daten für eine wirtschaftliche Betriebsführung zur Verfügung, die außerdem Einfluß auf eine planmäßige Unterhaltung haben können. Da alle Daten auf Datenträger aufgenommen, aber auch jederzeit geschrieben werden können, ist eine Dokumentation für eine vergleichende Beurteilung der Gesamtanlage und von Einzelkomponenten über einen längeren Zeitraum möglich.



**Abb. 7: Belastungsdiagramm — Reaktionskräfte (Kraft-Zeitverlauf) am Trogantriebsritzel infolge Bremswirkung bei Notstop**

Beispielhaft sind auf Abb. 7 in Abhängigkeit von der Zeit die nach oben bzw. unten gerichteten Ritzelumfangskräfte bei einem Notstop sowie zeitgleich die Wirkung der Betriebs- und Haltebremse mit dem Bremsweg dargestellt. Bemerkenswert sind die erst nach Stillstand des Troges allmählich abklingenden Schwingungen der großen, kurzfristig abgebremsten Massen; im Trog war in diesem Fall eine geringfügige Überschreitung des Wasserstandes bei einer Bergfahrt vorhanden.

Erwähnt sei noch der Drehriegel, der nur im außergewöhnlichen Lastfall (z.B. Leerlaufen des Troges) wirkt. Eine im Drehriegelgehäuse vierpunktgelagerte und sich drehende Stahlmutter setzt sich bei Überschreitung der zulässigen Last nach dem Stillsetzen des Trogantriebes auf den Gewindeflanken der Spindel ab. Ein Spiel von  $\pm 30$  mm vermeidet eine Berührung der Gewindeflanken der Stahlmutter mit denen der Spindeln während der Trogfahrt. Gelagert sind die vorgespannten Spindeln im Turmkopf und -fuß (Abb. 3).

### Umrichter

Jeweils 2 diagonal gegenüberliegende Motoren des Trogantriebes werden von einem Umrichterblock gespeist. Für die 4 Antriebsmotoren sind somit 2 separate Speiseeinheiten vorhanden, so daß bei Störungen in einem System die Aufrechterhaltung des Fahrbetriebes mit dem anderen möglich ist.

Jeder Umrichterblock besteht aus einem geregelten Gleichrichter mit Gleichstromzwischenkreis und einem selbstgeführten Wechselrichter. Er versorgt die beiden zugehörigen

Fahrmotoren mit Drehstrom von 0—50 Hz bei max. 380 V und übernimmt durch elektronische Frequenz- und Spannungsregelung die Geschwindigkeitssteuerung. Die Anlage kann im Vierquadrantbetrieb (motorisch oder generatorisch in beiden Richtungen) ggf. mit Rückspeisung in das Netz betrieben werden. Der Umrichter arbeitet nach dem Unterschwingverfahren und kann im Bedarfsfall manuell auf jeden Zwischenwert von 0—50 Hz eingestellt werden. Die Erfahrungen haben gezeigt, daß der motorische Betrieb eine bessere Verfügbarkeit der Anlage gewährleistet, so daß er bevorzugt zur Anwendung kommt.

Die 4 Antriebseinheiten sind durch ein Ausgleichswellensystem mechanisch untereinander verbunden; auch hierdurch ist ein Fahrbetrieb mit nur 2 Antriebsmotoren möglich.

Dem Antriebssystem angeschlossen ist eine Störwerterfassungsanlage. Erst diese läßt mit ihrer elektronischen Datenverarbeitung eine Feststellung von zeitlich gleich oder zeitlich verschoben aufgelaufenen Störungen im Hundertstel-Sekundenbereich zu, die anschließend in der Reihenfolge ihrer Auslösung geschrieben werden. Für eine Störungsauffindung und die Klärung der Ursachen können so die zur Beurteilung der Anlagensysteme erforderlichen Daten aufbereitet werden.

Die Betriebserfahrungen haben gezeigt, daß sinnvoll eingebaute Meßsysteme bei derart komplexen Anlagen — nicht zuletzt auch im Zuge der zunehmenden Automatisierung — unentbehrlich sind. Sie haben auch wirtschaftliche Bedeutung, weil sie die Störungssuche vereinfachen und verkürzen und so die Verfügbarkeit der Gesamtanlage verbessern.

Für rechnergesteuerte Anlagen und für die allgemeine Überwachungsanlage ist eine zusätzliche unterbrechungslose Stromversorgung mit 220 V Betriebsspannung (USV-Anlage) vorhanden, um Rechner-Störungen durch Spannungseinbrüche und -ausfälle zu verhindern und um die nötigen Informationen über Störungsursachen in jedem Fall speichern zu können.

### **3.3 Feuererkennung und -bekämpfung**

Alle betriebswichtigen Bereiche des Hebewerkes werden durch automatische Feuermeldanlagen überwacht und die Gefahrenmeldungen an zentraler Stelle angezeigt.

Der Schaltraum für die Antriebsanlage mit den angrenzenden Meß- und Steuerungsanlagen sowie der Steuerstand mit einigen Elektronikräumen werden zusätzlich durch eine automatische Feuerlöschanlage geschützt. Als Löschmittel wird Halon-Gas verwendet, das nach dem aktuellen Erkenntnisstand für die gestellten Aufgaben besonders geeignet ist. Darüber hinaus sind die Tröge für den Fall eines Schiffsbrandes mit je 6 Wasser-Schaummittelkanonen und außerdem mit einer Sprühanlage zum Schutz der Gegengewichtsseile ausgerüstet.

## **Teil 2**

### **Entwicklungen bei den Sparschleusen der Main-Donau-Verbindung**

#### **1. Einführung**

Die rund 170 km lange Verbindung von Main und Donau (MDV) wird auf eine Länge von etwa 100 km als Stillwasserkanal ausgeführt. In diesem Bereich werden zur Überwindung der