10

Hydromechanische Vorgänge bei der Schleusenfüllung.

Von Prof. Dr.-Ing. H. Wittmann und Dr.-Ing. W. Bleines, Karlsruhe.

I. Berechnung der Schleusenfüllung.

Das Füllen einer Schleusenkammer ist ein nichtstationärer Strömungsvorgang. Zu seiner Berechnung kann zunächst ein gleichbleibender Oberwasserspiegel (OW) angenommen werden. Die Hebung des Wasserspiegels in der Kammer ist abhängig von der Schleusengrundfläche F (m²), der Füllhöhe x (m), dem Beiwert der Eintrittsöffnungen μ, der Durchflußfläche der Umläufe (m²) und der Hubhöhe H (m). Diese Größen bestimmen die Füllzeit t aus der allgemeinen Gleichung

$$- F\, dx = \mu\, v\, f\, dt \qquad (1)$$

Von wesentlichem Einfluß ist die Öffnungszeit t_1 des Füllorgans, in der die Durchflußfläche f freigegeben wird. Ist sie sofort voll durchflossen und f_0, dann kann die Öffnungszeit des Verschlusses t_1 gegenüber der Füllzeit t vernachlässigt werden, und die Füllzeit t beträgt

$$t = \frac{2\, F\, \sqrt{H}}{\mu \sqrt{2g}\, f_o} \qquad (2)$$

Da diese Annahme jedoch im allgemeinen nicht zutrifft, muß die Veränderlichkeit von f berücksichtigt werden

$$f = \varphi\,(t) \text{ und } \mu = \psi\,(t).$$

Der Beiwert μ kann wegen der geringen Schwankungen unveränderlich angenommen werden und Gl. (1) wird

$$- F\, dx = \mu\, v \cdot \varphi\,(t)\, dt.$$

Bei gleichmäßiger Hebung des Füllorgans und stetiger Freigabe der Öffnung ($\frac{df}{dt}$ = constant) kann angenähert gesetzt werden, was aber streng genommen nur für den rechteckigen Füllquerschnitt gültig ist:

$$f = \varphi\,(t) = \frac{f_o}{t_1}\, t = C \cdot t$$

worin die Öffnungszeit t_1 unverändert ist.

$$C = \frac{f_o}{t_1}\ (m^2/s)$$

entspricht einer Zunahme der Durchflußfläche.

Aus Gl. (1) und (2) wird

$$- F\, dx = \mu\, v\, C \cdot t\, dt$$

oder mit $v = \sqrt{2gx}$ und den Bezeichnungen der Abb. 1

$$\int_{H}^{H_1} \frac{- F\, dx}{\mu \sqrt{2gx}} = \int_{o}^{t_1} C \cdot t\, dt$$

t_1 ist in diesem Falle die Zeit der stetigen Öffnung bis zur Freigabe des vollen Durchflußquerschnitts. Es wird dann

$$\frac{-2F\sqrt{x}\Big|_{H_1}^{H}}{\mu\sqrt{2g}} = C\frac{t_1^2}{2} \quad \text{und} \quad t_1^2 = \frac{4F(\sqrt{H}-\sqrt{H_1})}{\mu\sqrt{2g}\,C}$$

Aus einer gegebenen oder angenommenen Öffnungszeit t_1 errechnet sich die zur Zeit t_1 noch verbleibende Füllhöhe H_1 (Abb. 1) zu:

$$H_1 = \left(\sqrt{H} - \frac{t_1\,\mu\sqrt{2g}\,f_o}{4F}\right)^2$$

und die gesamte Füllzeit zu:

$$t = t_1 + t_2 = t_1 + \frac{2F\sqrt{H_1}}{\mu\sqrt{2g}\cdot f_o}$$

Öffnungszeit t_1 und Füllzeit t fallen zusammen, wenn $H_1 = o$ und $C = \frac{f_o}{t_1} = \frac{f_o}{t}$ gesetzt wird. Man erhält dann:

$$t^2 = \frac{4F\sqrt{H}}{\mu\sqrt{2g}\,\frac{f_o}{t}} \quad \text{oder} \quad t = \frac{4F\sqrt{H}}{\mu\sqrt{2g}\,f_o} \qquad (3)$$

d. h. den doppelten Wert der Füllzeit wie bei plötzlicher vollständiger Freigabe der Füllöffnungen.

Für eine 300 m lange Schleuse mit H = 4,60 m, B = 12 m, f_0 = 10 m² sind die Füllzeiten bei verschiedenen Öffnungszeiten und stetiger Hebung des Füllschützes berechnet und in Abb. 2 aufgetragen. Wird $t_1 = 0$, die ganze Öffnung der Füllschütze also plötzlich freigegeben, so wird die überhaupt mögliche kürzeste Füllzeit der Schleuse 9′ 2″. Bei 18′ 4″ werden Öffnungszeit t_1 und Füllzeit t gleich. Modellversuche haben die Rechnung bestätigt. Als μ-Wert war der des Modells mit 0,70 eingesetzt. Bei der für die Vergleichsversuche herangezogenen Naturschleuse ergab sich ein μ-Wert von 0,75. Die Füllzeit liegt entsprechend niedriger (8′ 26″ und 16′ 52″) (Abb. 2).

Werden die Füllöffnungen nicht stetig freigegeben, ist also die Zeitweglinie nicht eine Gerade, sondern ein gebrochener Linienzug, so kann auch hierfür die Füllzeit mit den genannten Gleichungen berechnet werden. Für alle Steigungsverhältnisse ist jeweils $H - \Sigma\triangle H$ zu berechnen und als Ausgangswert für das nächste Steigungsverhältnis einzusetzen. Für den Restteil der Füllung ist Gl. (2) zu verwenden.

An einem Modell im Maßstab 1 : 25 der natürlichen Größe wurden die Längs- und Seitenkräfte gemessen, die bei voller Belegung der 300 m langen Schleuse mit einem Schlepper und drei 1350 t Kähnen, auf den in 36 m vom Oberhaupt entfernt liegenden Meßkahn wirken (Abb. 2). Werden Längskräfte von 1/600 bis 1/750 der Verdrängung des 1350 t Kahnes mit V = 1665 m³, also etwa 2,2 t zugelassen, so könnte bei stetiger Hebung der Füllschütze eine Füllzeit von rd. 12′ erreicht werden. Es ist also äußerstenfalls eine Füllzeit von $t_{min} + {}^1/_3\, t_{min} = 1{,}33\, t_{min}$ möglich. Der Wert entspricht den bekannten Annahmen, ist aber aus Sicherheitsgründen auf 1,5 t_{min} zu vergrößern.

II. Bewegungen des Kammerwasserspiegels beim Schleusen.

Die Längskräfte bei der Füllung werden entscheidend beeinflußt vom ersten Füllschwall, der abhängig ist von der Größe der freigegebenen Schützöffnung, vom freien Wasserquerschnitt in der Kammer sowie vom Zusammentreffen des zurückgeworfenen Schwalles mit dem erneuten Füllschwall. Die

Belegung der Kammer durch ein bis drei Kähne in dem genannten Beispiel macht sich insofern bemerkbar, als der Einzelkahn größere Längskräfte wie ein Schleppzug mit drei Kähnen erreicht, der den Verlauf der Kraftlinien dämpft. Aus Messungen des Wasserspiegelverlaufs in der 300 m langen Schleuse Erlabrunn der Mainkanalisierung und Vergleichen mit Modellversuchen ließen sich diese Einflüsse feststellen (Abb. 3).

Als Öffnungsart wurde hierbei die bei einem schwachen Verkehr genügende, stufenförmige Hebung der Füllschütze beibehalten. Gemessen sind die Bewegungen des Wasserspiegels in Natur und im Modell in 30 m Abstand vom Scheitel des Oberhauptdrempels und dargestellt die Füllungslinien dH/dt für die drei ersten, die Schwallbewegung in der Schleuse hauptsächlich erzeugenden Öffnungsstufen. Während bei den leeren Schleusen (Fall A) die Füllungslinien völlig übereinstimmen, die Ähnlichkeit der Füllvorgänge im Modell mit denen der Natur also nachgewiesen ist, verschieben sie sich bei B wenig, im Falle C jedoch soweit, daß die Punkte 2 nach 2*, 3 nach 3* verschoben und die Laufzeit des Schwalles von a_1 auf a_1' verlängert werden. Bei Punkt 4 (3*) ist ein Schwall überhaupt ausgefallen. Die Geschwindigkeit der Schwalle wird aus $C = \sqrt{gT}$ mit zunehmender Tiefe T größer ($a_2 < a_1$).

III. Analyse der Schwingungen in der Schleusenkammer.

Die genannten Beobachtungen waren Anlaß zu eingehenderen Feststellungen über die Schwingungen der Wassermasse in einer Schleusenkammer während der Füllung. An den 8 Pegeln der Schleuse Erlabrunn der Mainkanalisierung (Abb. 4) wurde die Höhenlage des Wasserspiegels in kurzen zeitlichen Intervallen festgestellt (Abb. 5). Die Schleuse war während der Messungen leer, so daß die beobachteten Schwingungen des Wasserspiegels durch eine Belegung nicht gestört sind. Die Schütze der Torumläufe wurden in 85 sec. stetig gehoben. Die Füllung war nach etwa 8 Minuten beendet. Sie ist wesentlich kürzer als eine normale Betriebsschleusung, so daß Schiffe in der Kammer nicht liegen können.

Nach der zeitlichen Folge der Wasserspiegellängsschnitte (Abb. 5) beginnt der Füllvorgang mit einer Schwallwelle, die durch die Schleuse wandert. Die weitere Füllung erzeugt immer neue Hebungen des Wasserspiegels, die als ein System fortschreitender Wellen durch die Kammer wandern. Haben die ersten Schwallwellen das Untertor erreicht und werden dort reflektiert, so verschwindet das äußere Bild der Schwallwellen. Es bleibt ein periodischer Gefällewechsel des gesamten Wasserspiegels zwischen Ober- und Unterhaupt sowie die ansteigende und wieder abklingende Zunahme der Spiegelhöhen, besonders ausdrücklich an den Häuptern, bestehen.

Die Ganglinien der Wasserstände im oberen Vorhafen (Abb. 6) tragen die allgemeinen Kennzeichen einer gedämpften Schwingung, deren Amplituden im zeitlichen Ablauf und mit der Entfernung der Pegelstelle vom Oberhaupt erheblich kleiner werden. Sie rührt daher, daß mit dem Beginn der Wasserentnahme aus dem oberen Vorhafen sich der Wasserspiegel an der Entnahmestelle senkt und die Senkung als Sunkwelle durch den oberen Vorhafen bis in den gestauten Fluß wandert. Das dabei zwischen Stauhaltung und Oberhaupt auftretende Gefälle des Wasserspiegels führt dem Oberhaupt bald mehr Wasser zu als durch die Umläufe in die Schleuse fließen kann. Der entstehende Aufstau am Oberhaupt erzeugt ein Gegengefälle vom Oberhaupt zum Fluß, wodurch Wasser von der Schleuse weggeführt wird. Die nachfolgende Senkung mit ihrem größeren Gefälle bedingt einen vergrößerten Zufluß zur Schleuse, dem eine erneute Spiegelhebung folgt. Damit ist in der Schleusenkammer die

ansteigende und wieder abklingende Zunahme der Spiegelhöhen in Abb. 5 verbunden.

Aus den Wasserspiegellängsschnitten der Abb. 5 entwickelte Ganglinien an den Pegeln in der Schleusenkammer haben die Form der Füllungslinien in Abb. 3. Sie lassen den Schwingungsvorgang nur mittelbar erkennen, da er der allgemeinen Aufwärtsbewegung des Wasserspiegels beim Füllen überlagert wird. Er wird erst sichtbar, wenn die Füllungslinien auf eine zeitlich veränderliche Ebene bezogen werden, die die allgemeine Hubbewegung des Wasserspiegels mitmacht. Als eine derartige Ebene kann die aus den Spiegellängsschnitten gewonnene gemittelte Ganglinie des Kammerwasserspiegels angesehen werden. Die Höhenunterschiede zu den Ganglinien der einzelnen Pegel ergeben die Schwingungslinien für die einzelnen Pegelstellen in der Kammer (Abb. 7).

Solche Schwingungslinien sind für den am Oberhaupt und den in Kammermitte gelegenen Pegel in Abb. 8 bei der stetigen Freigabe in 85 sec. dargestellt. Die Schwingungslinie des Pegels am Unterhaupt verläuft zeitlich verschoben, aber ähnlich wie die Linie am Oberhaupt. Werden die Umläufe stufenweise geöffnet (Abb. 2) so zeigen die Schwingungslinien von Beginn der Füllung an einen fast regelmäßigen, periodischen Verlauf, der erst durch die zweite Öffnungsstufe gestört wird, sich aber im weiteren Ablauf wieder ausbilden kann. Bei einem Füllvorgang mit fünf Öffnungsstufen traten die größten Schwingweiten erst nach der vierten Stufe auf, ein Vorgang, der bei der Messung von Trossenkräften geschleuster Schiffe wiederholt beobachtet wurde.

Sieht man von den Besonderheiten der einzelnen Betriebsvorgänge ab, so läßt sich allgemein feststellen, daß die Amplituden der Wasserspiegelschwingungen im zeitlichen Ablauf der Füllung abnehmen. Diese Dämpfung erklärt sich aus der abnehmenden Höhe der neu in die Kammer tretenden Schwalle und aus der Abschwächung der wiederholt reflektierten alten Schwalle. Die zeitliche Abnahme der Länge der Schwingungsperioden ist durch die größere Schwallschnelligkeit bei größer werdender Kammerwassertiefe bedingt. Außerdem ergibt sich aus allen Schwingungslinien, daß die Amplituden an den beiden Häuptern erheblich größer sind als in Kammermitte und daß die Schwingungsperioden an den Häuptern etwa doppelt so lang sind wie in Kammermitte.

Diese Erscheinung kann aus dem Verhalten eines Einzelschwalles, der mehrfach durch die Kammer wandert, erklärt werden.

Ein Einzelschwall mit lotrechtem Kopf von der Höhe h hebt bei seinem Eintritt in die Kammer (Zeitpunkt 0) den Wasserspiegel am Oberhaupt um den Betrag h über den horizontalen Ausgangskammerspiegel. Die Anfangsamplitude der Wasserspiegelschwingung hat also am Oberhaupt die Größe h. Die Kopfhöhe h des Einzelschwalles soll für die weitere Betrachtung unveränderlich sein, und der Wasserspiegel soll vor und hinter dem Schwallkopf immer horizontal liegen. Der Einfluß der Reibung auf die Schwallform wird also zunächst vernachlässigt. Während der Schwall durch die Kammer wandert, bleibt also der Wasserspiegel am Oberhaupt zunächst konstant, die mittlere Kammerspiegelhöhe nimmt jedoch stetig zu. Wenn der Schwallkopf das Unterhaupt erreicht hat (Zeitpunkt π), liegt der gesamte Kammerspiegel horizontal. Die Amplituden der Schwingung sind also für alle Punkte der Kammer gleich Null. Beim Rücklauf des Schwalls liegt der Wasserspiegel am Oberhaupt unter dem mittleren Spiegel der gesamten Kammer, die Amplituden sind in diesem Zeitraum also negativ. Sie erreichen ihren größten negativen Wert h kurz vor der Rückkehr des Schwallkopfes zum Oberhaupt (Zeitpunkt 2π). Bei der Reflexion am Oberhaupt hebt sich der Wasserspiegel in kurzer Zeit um den

Betrag 2 h zur Amplitude + h, um dann mit der Schwallhöhe h erneut in die Kammer zu wandern. Der Wasserspiegelverlauf wiederholt sich von diesem Zeitpunkt ab periodisch. Dabei wurde zunächst vereinfachend angenommen, daß jeder Schwalldurchgang durch die Kammer die gleiche Zeit π beansprucht, die Schwingungsperiode also die doppelte Zeit $2\,\pi$ beträgt.

Die Zeit, die ein Schwall von einem der Häupter zur Kammermitte braucht, beträgt dann nur $\pi/2$. Nach $2 \cdot \pi/2 = \pi$ wiederholt sich jeweils der Schwingungsvorgang des Wasserspiegels in Kammermitte. Die Schwingungsperiode ist also in Kammermitte halb so lang wie an den beiden Häuptern. In Kammermitte kann die Hebung des Wasserspiegels beim Durchgang des Einzelschwalles daher immer nur um die Kopfhöhe h erfolgen, da hier keine Reflexion mit Verdoppelung des Wasserspiegelanstieges stattfindet. Die Amplituden in Kammermitte betragen bei einem Schwall mit lotrechtem Kopf also immer nur die Hälfte der Werte an den Häuptern.

Ein solcher Schwall darf bei betrieblich richtigen Schleusungen aber nicht auftreten, da er plötzliche und heftige Bewegungen der geschleusten Schiffe hervorrufen würde. Bei einem Schwall mit stetig ansteigender Schwallfront verläuft die Wasserspiegelschwingung jedoch ähnlich wie beim lotrechten Schwallkopf. Eine schematisch vereinfachte Betrachtung in der eben genannten Art ergibt, daß beim stetig ansteigenden Schwall die Längen der Schwingungsperioden an den Häuptern und in Kammermitte sich wieder wie 2 : 1, die Amplituden aber wie 4 : 1 verhalten. Die gleichen Verhältnisse ergeben sich im Mittel der Erlabrunner Versuche (Abb. 8), so daß die Besonderheiten der Wasserspiegelschwingung in der Schleusenkammer ausreichend erklärt sind.

Bei wirklichen Schleusenfüllungen entsteht immer eine Vielzahl von Einzelschwallen, die als positiv bezeichnet werden, wenn sie durch eine Zunahme der Zuflußmenge, als negativ, wenn sie durch eine Abnahme hervorgerufen werden. Den einfachen Schwingungslinien beim Einzelschwall entsprechen bei einem Schwallsystem die aus Überlagerung von Einzelschwingungen gewonnenen Schwingungslinien des gesamten Füllvorganges.

Bei der Konstruktion wirklicher Schwingungslinien ist jedoch außer dem zeitlichen Verlauf des Zuflusses auch die Dämpfung der Schwingungsamplituden durch Verminderung der Schwallhöhen und die Verkürzung der Schwingungsperioden bei Zunahme der Wassertiefe in der Kammer zu berücksichtigen. Da diese Erscheinungen schon wiederholt, vor allem an Kraftwerkkanälen beobachtet und gemessen wurden, konnte ein konstruktives Verfahren entwickelt werden, um zu jeden Füllvorgang einer Schleuse die Wasserspiegelschwingung an irgendeinem Punkt der Kammer zu ermitteln. Hierbei wurde für jede untersuchte Schleusenfüllung das entstehende Schwallsystem aus der berechneten Zuflußmengenlinie analysiert. Die Schwingungen der Einzelschwalle wurden auf zeichnerischem und mathematischem Wege unter Berücksichtigung der Dämpfung ermittelt und aus ihnen durch Überlagerung die Schwingungslinien des Schwallsystems gewonnen. Untersucht wurden die Schleusenfüllungen an der Schleuse Erlabrunn der Mainkanalisierung, Schleusenfüllungen an Modellen des Flußbaulaboratoriums Karlsruhe und Messungen von mehrfach reflektierten Schwallwellen in einer Kanalhaltung. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und konstruierten Linien war in allen untersuchten Fällen in Bezug auf Schwingungsamplituden und -perioden gut.

IV. Beurteilung von Betriebsvorgängen mit Hilfe von Schwingungslinien.

Die Konstruktion der Schwingungslinien erfolgt, um die Kräfte in den Trossen eines in der Kammer liegenden Schiffes, die bei dem geplanten Betriebsvorgang einer Füllung zu erwarten sind, im voraus beurteilen zu können.

Die Bewegungen des Wasserspiegels sind zwar nicht die einzigen Ursachen der Trossenkräfte. Bei langen, schmalen Flußschleusen begründen sie jedoch im wesentlichen ihr Auftreten. Denn während in Nähe der Füllstelle (Oberhaupt) die Ausbildung der Fülleinrichtungen von Bedeutung für die Trossenkräfte ist, wird der weitaus größere Teil der Schleusenkammer fast ausschließlich von den Schwallen, also vom Verlauf der Zuflußmengenlinie, beherrscht.

Die Zusammenhänge, die zwischen Zuflußmengen, Schwallhöhen und Trossenkräften grundsätzlich bestehen, werden im Folgenden wieder mit Hilfe der schematischen Schwalldarstellung erläutert (siehe Abb. 9):

Bei einem Schwall mit lotrechtem Kopf und horizontalem Rücken (Abb. 9, Schwallform 1), der bei plötzlicher Zunahme der Wassermenge um den Betrag $\triangle$ Q entsteht, kommt ein Schiff in der Schleusenkammer in Bewegung, sobald die Schwallwelle seinen Bug oder sein Heck erreicht. Die Trossenkräfte, die zur Aufnahme dieser Bewegung erforderlich sind, wachsen mit dem jeweiligen Spiegelunterschied zwischen Bug und Heck, also hier mit der Schwallhöhe an. Vernachlässigt man die Trägheit des Schiffes und die Wirkung der Nebenwellen, die durch die teilweise Reflexion des Schwalls am Schiff entstehen, so gleicht der Verlauf der Trossenkräfte den in Abb. 8 am Pegel 1 gezeigten Wasserspiegelunterschieden. Die Zugkräfte in den Trossen sollen als positiv bezeichnet werden, wenn das Schiff zum Unterhaupt hin bewegt wird und negativ, wenn der am Unterhaupt reflektierte Schwall wieder am Heck ankommt und das Schiff zum Oberhaupt treibt. Negative Kräfte sind in jedem Falle unerwünscht. Ein Schiff, das durch die vorhergehende Bewegung nach dem Unterhaupt fest in den gespannten Trossen liegt, wird durch sie plötzlich gegen das Obertor gedrängt und kann dabei das Tor oder andere Schiffe rammen.

Der Schwall, dessen Höhe von Null aus linear zunimmt (Abb. 9, Schwallform 2) ruft völlig andere Spiegelunterschiede hervor. Sie nehmen linear zu, solange die Schwallspitze das Schiff passiert, bleiben dann konstant, bis die zurückkehrende Schwallspitze am Heck ankommt, um schließlich bis auf den Wert Null abzusinken. Da sich bei dieser Schwallform der durchlaufende und rücklaufende Schwall wie zwei Keile mit gleichem Winkel an der Spitze aufeinanderschieben, tritt höchstens eine waagerechte Spiegellage aber kein negatives Gefälle ein. Beim wirklichen Schwall können jedoch auch dann, wenn die eintretende Schwallhöhe linear anwächst, kleine negative Gefälle auftreten, da die Schwallfront die Neigung hat, allmählich steiler zu werden.

Dieser Erscheinung kann dadurch begegnet werden, daß der stetig anwachsende Schwall durch einen nachfolgenden zweiten positiven Schwall verstärkt wird (Abb. 9, Schwallform 3). Der Wasserspiegel am Oberhaupt liegt dann zu jedem Zeitpunkt der Füllung höher als in der übrigen Kammer. Die Spiegelunterschiede sind also immer positiv oder werden höchstens gleich Null.

Um dies erkennen zu können, ist es nicht erforderlich, die Wasserspiegelganglinien an zwei oder mehreren Stellen der Kammer zu ermitteln. Da die Spiegelunterschiedlinien periodisch verlaufen, also Schwingungslinien darstellen, können sie wie andere Schwingungslinien überlagert werden. Die Unterschiedslinien bei Schwallform 3 lassen sich demnach unmittelbar durch Überlagerung zweier positiver Schwingungslinien der Schwallform 2 erhalten.

Wird einer positiven Schwingung der Spiegelunterschiede eine nachfolgende negative überlagert, so ergeben sich die Spiegelunterschiede der Schwallform 4 (Abb. 9). Sie entsteht dann, wenn ein linear größer werdender Schwall etwas abgeschwächt wird, aber dennoch weiter zunimmt. Hierbei treten negative Gefälle auf, da der Wasserspiegel infolge der Abnahme oder verminderten

Zunahme der Zuflußmengen und Schwallhöhen am Oberhaupt zeitweise tiefer liegt als in der übrigen Kammer.

Aus der Betrachtung der Spiegelunterschiedslinien lassen sich folgende praktische Lehren ziehen:

Solange die Schwallhöhen nicht sprunghaft, sondern stetig zunehmen, sind nur Schiffsbewegungen vom Oberhaupt zum Unterhaupt der Schleuse zu erwarten. Sobald jedoch ein Nachlassen der stetigen Zunahme oder gar eine Abnahme der Schwallhöhen erfolgt, muß mit negativen Trossenkräften gerechnet werden. Eine Zunahme der Schwallhöhe beim Schleusenbetrieb kann aber nur durch eine Vermehrung der Zuflußmenge erreicht werden. Da dieser Vermehrung durch den kleiner werdenden Spiegelunterschied am Oberhaupt Grenzen gesetzt sind, muß das Bestreben dahin gehen, den Zeitpunkt, an dem die Zuflußmenge abzunehmen beginnt, durch raschere Freigabe der Füllöffnung solange hinauszuzögern, bis infolge der Dämpfung der Schwallhöhen große Trossenkräfte nicht mehr zu erwarten sind. Praktische Schleusenversuche im Karlsruher Flußbaulaboratorium ergaben schon früher die Zweckmäßigkeit solcher Maßnahmen. Die theoretische Untersuchung der Schwingungsprobleme zeigt nunmehr die Gründe hierfür auf.

V. Maßnahmen zur Verminderung der Schwalle und Schwingungen.

Die Größe des Füllschwalles und die Ausbildung der Schwingungen sind von der Zunahme der Füllwassermenge in der Zeiteinheit abhängig ($\triangle Q / \triangle t$). Anstelle der geradlinigen oder der stufenförmigen Öffnung der Füllschütze müßte eine unstetige Öffnungslinie angewendet werden, um die stetige Zunahme der Schwallhöhen zu sichern. An ihre Stelle kann aber eine Form der Schützöffnung oder des Füllspaltes treten, die bei gleicher Hub- oder Drehgeschwindigkeit des Füllorgans die Zunahme der Füllwassermenge regelt. Da zur Vermeidung eines übermäßigen Schwallkopfes das Füllwasser möglichst gleichmäßig verteilt in die Kammer eintreten soll, wird der Füllspalt bei neueren Toren auf die ganze Breite der oberwasserseitigen Wand des Tores eingelassen. Konstruktive und statische Bedingungen setzen den Abmessungen des Füllspaltes und damit dem Eintrittsquerschnitt und der größten Füllwassermenge ein Ziel.

Die Abb. 10 zeigt die Prüfung eines Segmenttores mit Füllspalt. Das Segmenttor hat den unbestreitbaren Vorzug einer einfachen Überwachung sämtlicher Bauteile während des Betriebes. Die Form des Füllspaltes und des Drempels sind voneinander abhängig. Der unterschnittene Drempel bildet die Rückwand eines Tosbeckens, in das der Füllstrahl, um mehr als 90° gedreht, eingelenkt werden muß. Ohne Rücksicht auf die ruhige Lage der Schiffe und bei plötzlicher Freigabe der größten Füllspaltweite würden 11′ 07″ zur Füllung genügen. Für einen am Obertor liegenden Seitenradschlepper von 412 t Verdrängung sind 0,59 bis 0,69 t als Trossenkräfte zulässig. Dementsprechend war das Tosbecken auszubilden.

Die Lösung x unterschneidet kräftig den Drempel und unterteilt den Raum durch Wände. Im Tosbecken sind außer einer Stoßschwelle, die den Verlauf der Trossenkräfte entscheidend beeinflußt, Einbauten vermieden. Die Ausbildung der Schwelle steht im Zusammenhang mit der Unterteilung der Drempelwand und erzeugt mit dieser ein System von energieverbrauchenden Wirbeln mit lotrechten und waagerechten Achsen. Die Freispülung des Tosbeckens von Ablagerungen wird durch die Schwelle nicht verhindert. Die stufenförmige Ausbildung des Übergangs vom Tosbecken in die Kammer ist von geringerer Bedeutung für den Verlauf der Trossenkräfte. Maßgebend war

hierbei die Rücksicht auf das umgelegte Tor, das an der unteren Tosbeckenwand einen Anschlag finden sollte, und das Bestreben, eingedrungenes Geschiebe leicht abzuspülen.

Bei der Lösung y ist der Drempel weniger unterschnitten und ein Bremsbalken eingesetzt. Schwelle und Tosbeckenform sind wie bei der Lösung x beibehalten.

Der Einfluß der Lösungen x und y ist aus den Kraftlinien des Längszuges nach dem Untertor erkennbar. Der Bremsbalken übt eine beruhigende Wirkung aus. Nachteilig ist die Möglichkeit, daß sich zwischen Bremsbalken, Füllspalt und Drempelwand Fremdkörper einklemmen und die Bewegung des Tores hemmen können. Das Tor wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedreht und erst in der letzten Phase rascher umgelegt, wobei zur Einfahrt der Schiffe in die Schleuse am Oberhaupt nur 3 m Tiefe freizugeben sind. Die Füllzeiten betrugen 18′ 30″ und 16′ 25″, also das 1,8- bis 1,4-fache der Füllung bei plötzlicher Freigabe des Füllspaltes auf 800 mm. Es werden zwar in keinem Falle die zulässigen Trossenkräfte überschritten, aber die Verkürzung der Füllzeit um zwei Minuten ergibt eine wesentlich größere Unruhe im Verlauf der Kraftlinien, bei der besonders der Wechsel der Kraftrichtung vom Obertor nach dem Untertor schädlich ist.

Eine noch weitergehende Verminderung der Schwalle und Schwingungen, gleichbedeutend mit wesentlich kürzeren Füllzeiten, kann erreicht werden, wenn die Verringerung der Füllwassermenge infolge Abnahme der Druckhöhe durch eine weitere Vergrößerung des Füllquerschnittes wettgemacht wird. Im Tor allein läßt sich diese Erweiterung nicht unterbringen. Die gleichzeitige oder zusätzliche Füllung durch Längs- und Stichkanäle gibt aber die Möglichkeit zu einer optimalen Lösung, so daß durch eine rhythmisch abgestimmte Verwendung beider Füllarten die kleinsten Füllzeiten erreicht werden können.

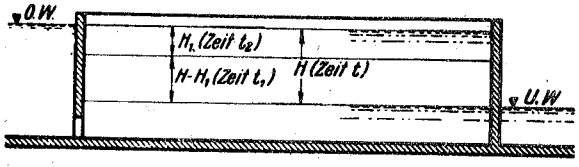

Abb. 1 Bezeichnungen der hydromechanischen Rechnung.

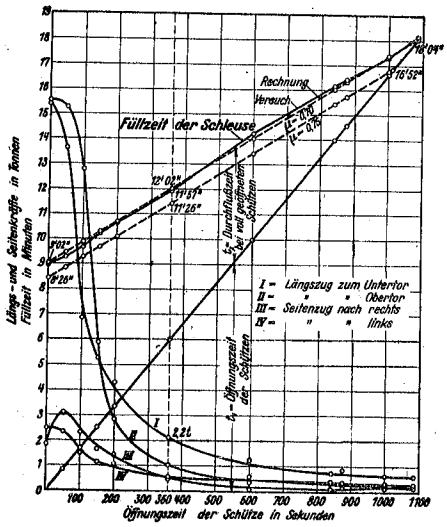

Abb. 2 Füllzeiten, Längs- und Seitenkräfte für einen Schleppzug in einer Schleuse mit L = 300 m, B = 12 m, H = 4.60 m. Abhängigkeit von den Oeffnungszeiten bei stetiger Hebung der Füllschütze.

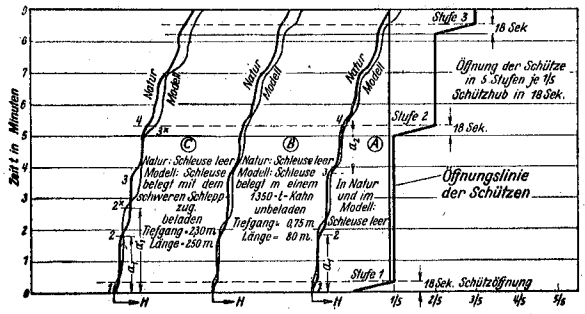

Abb. 3 Füllungslinien bei stufenweiser Oeffnung der Füllschütze mit verschiedener Belegung der Schleuse. Vergleich der Naturbeobachtungen mit Modellergebnissen.

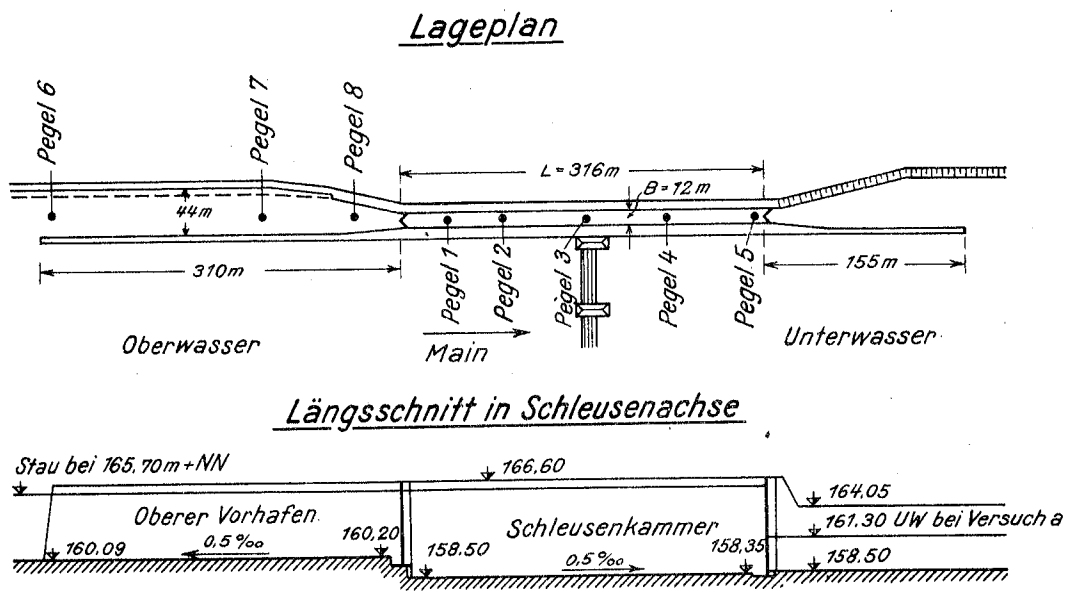

Abb. 4. Schleuse Erlabrunn, Lage der Pegelstellen.

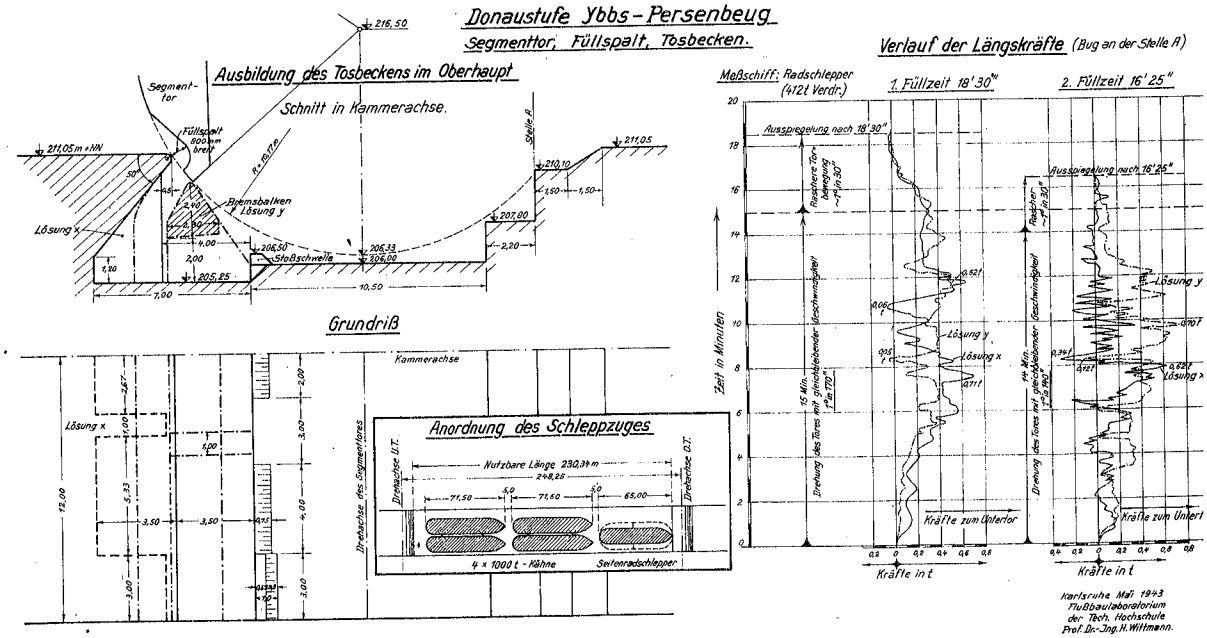

Abb. 10. Maßnahmen zur Verminderung der Schwalle und Schwingungen.
Prüfung eines Segmenttores mit Füllspalt.

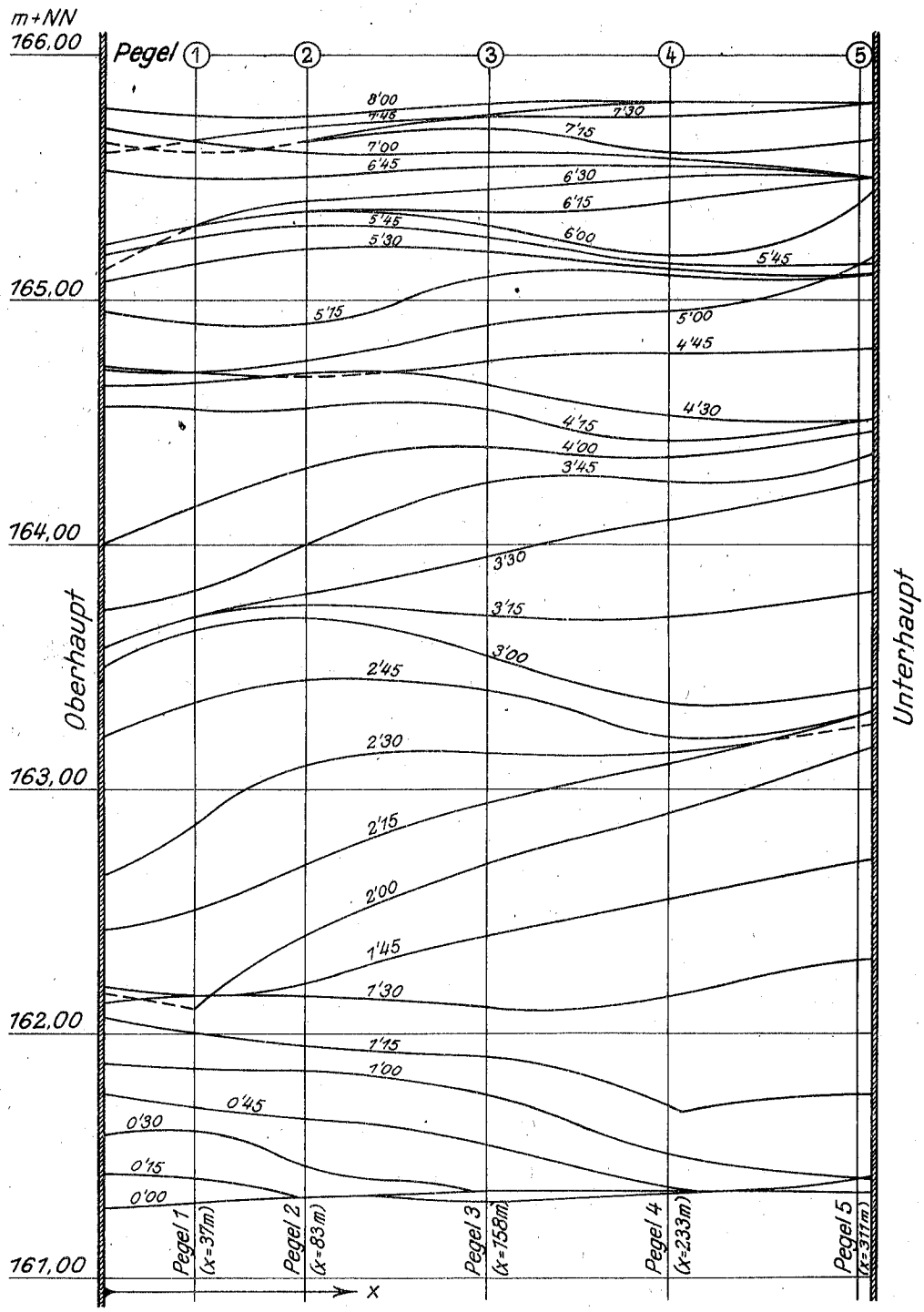

Abb. 5. Wasserspiegellängsschnitte in der Schleusenkammer Erlabrunn bei Füllung mit stetiger Hebung d. Schütze.

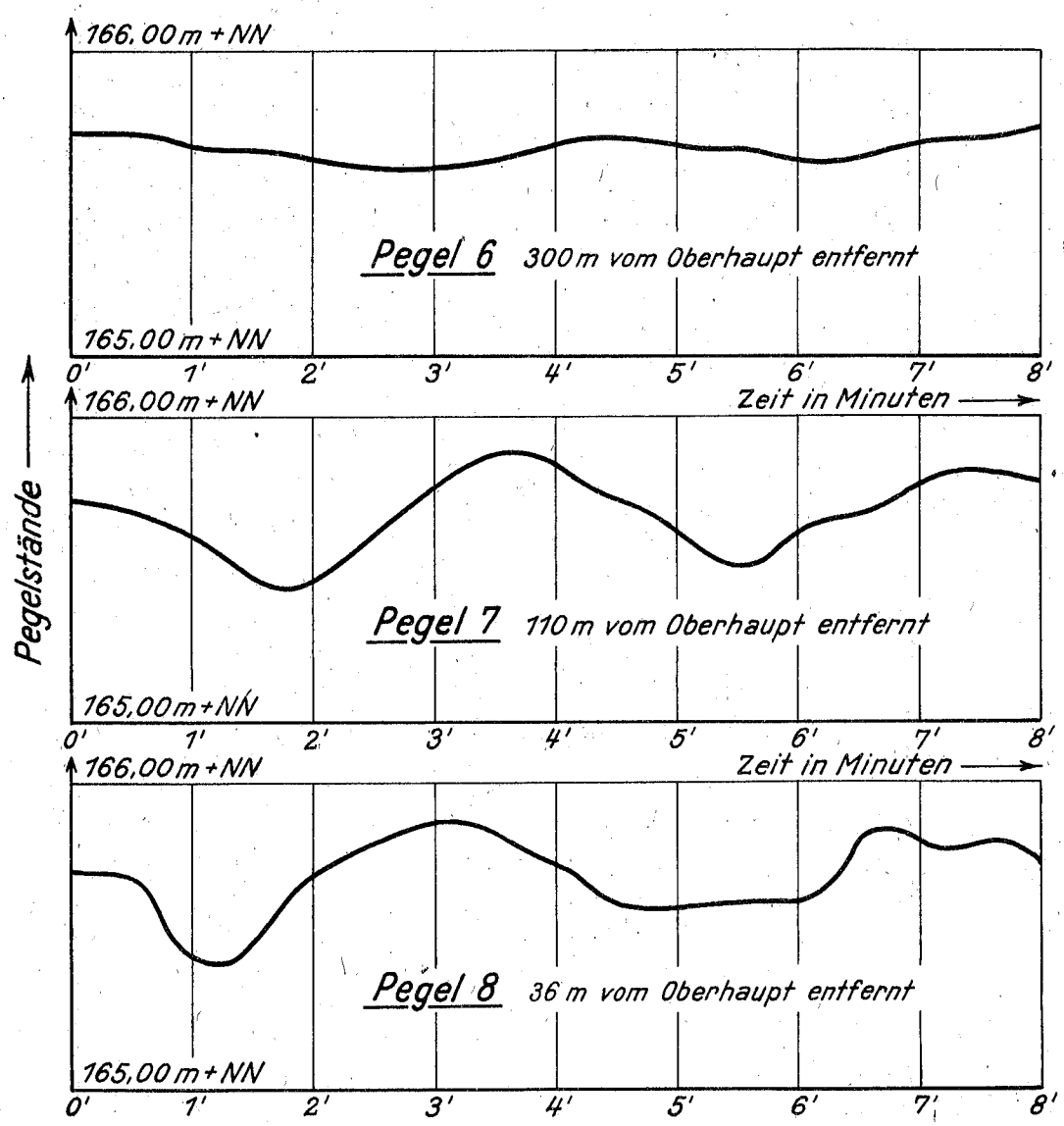

Abb. 6. Ganglinien der Wasserstände im Vorhafen der Schleuse Erlabrunn.

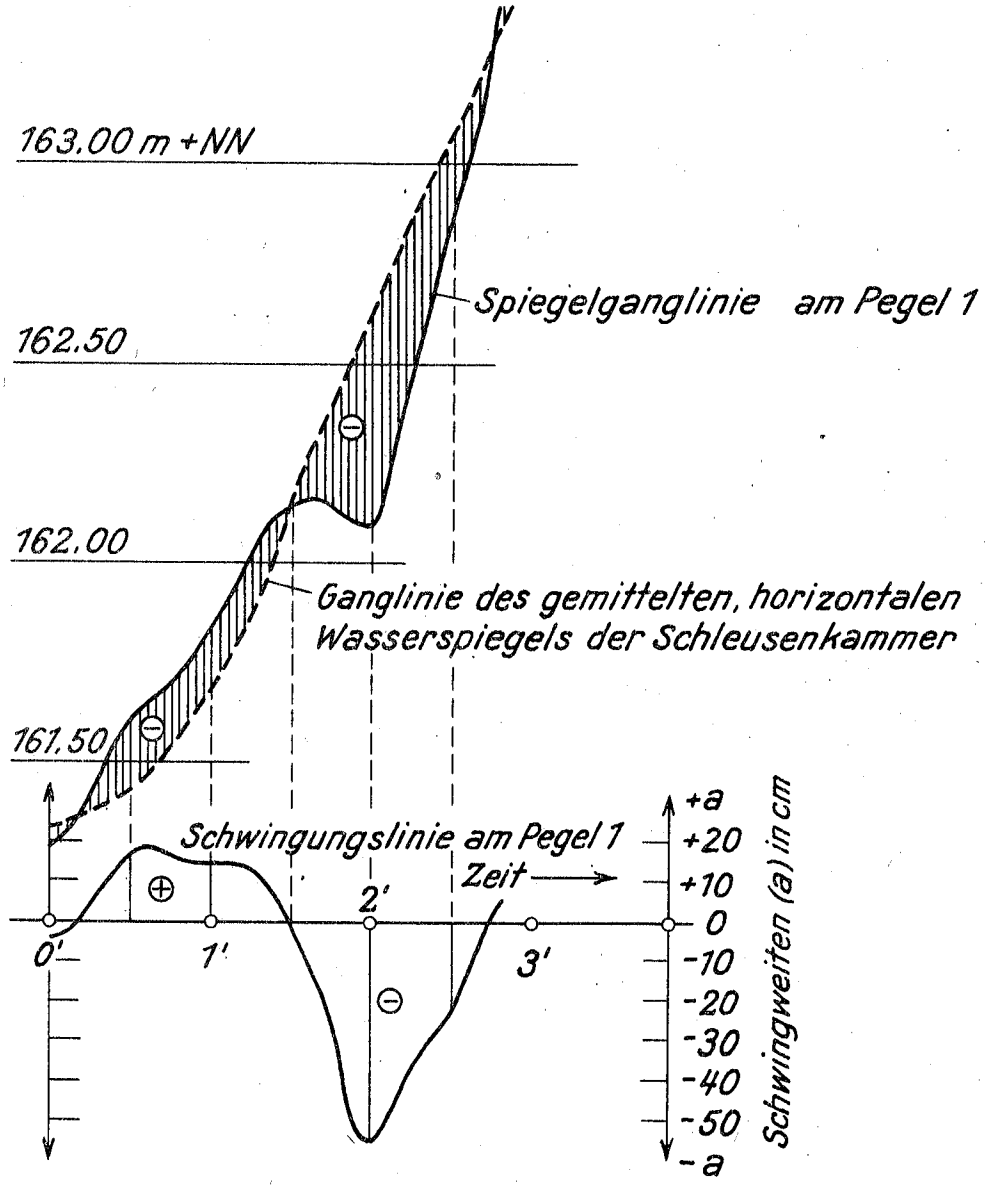

Abb. 7. Ermittlung einer Schwingungslinie aus der Ganglinie des Wasserspiegels.

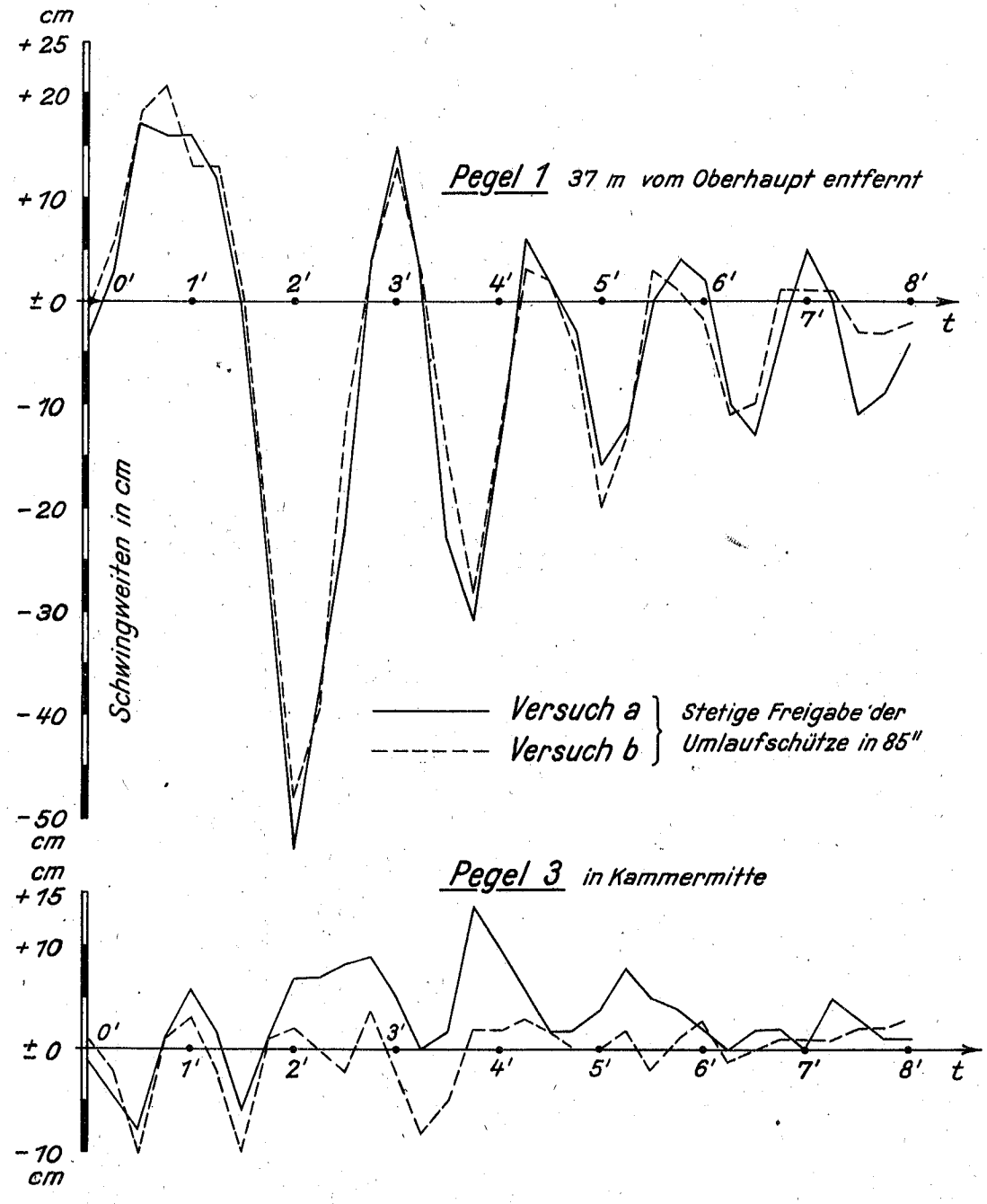

Abb. 8. Schwingungslinien bei stetiger Freigabe der Füllschütze an einem Pegel in der Nähe des Ober= hauptes und an einem Pegel in Kammermitte.

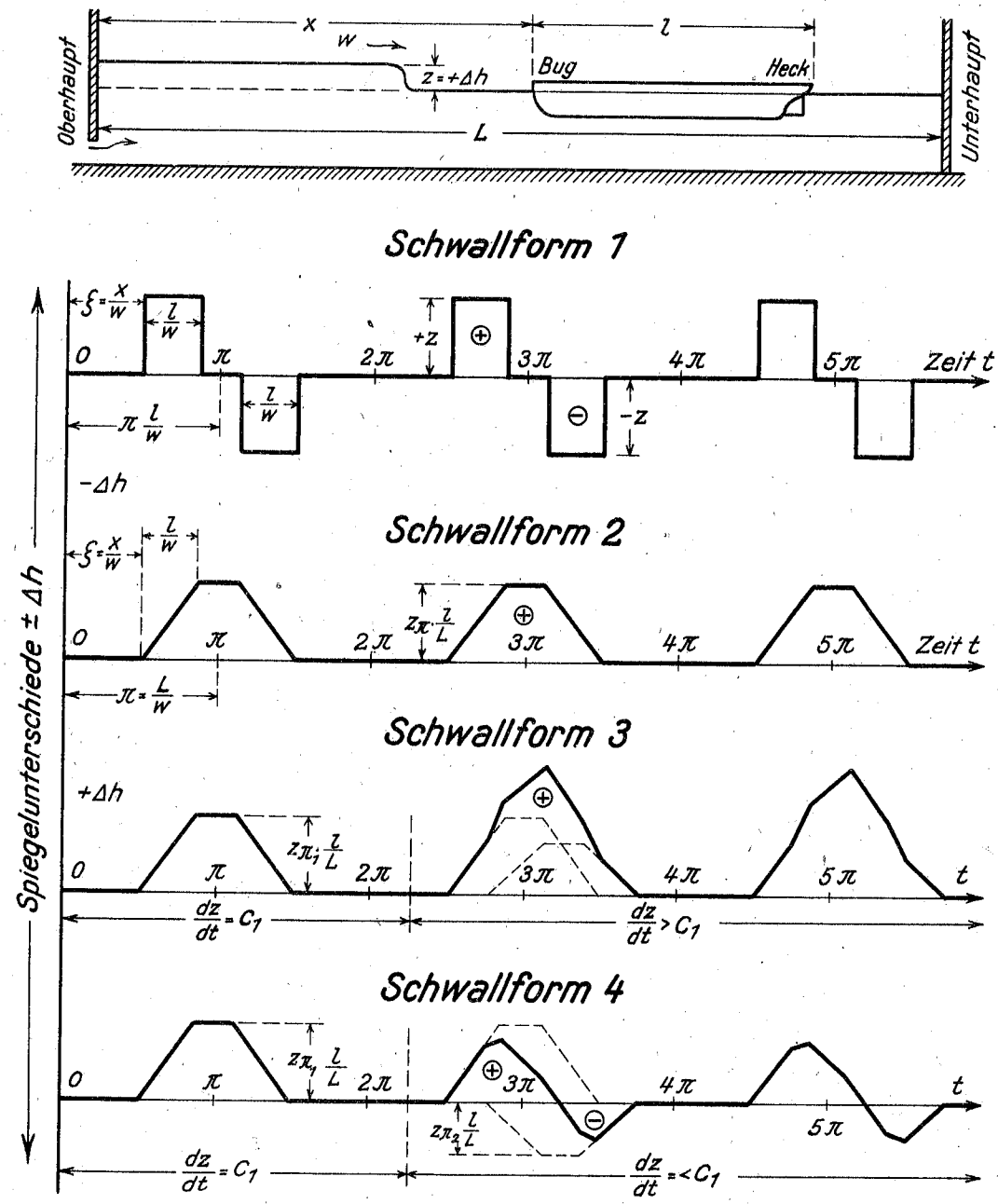

Abb. 9. Wasserspiegelunterschiede zwischen Bug und Heck bei verschiedenen Formen des Füllschwalls in schematischer Darstellung.