

Schleusungs- und Kraftwerkswellen in Schiffahrtskanälen

Von Friedrich Wiener, Wasserstraßendirektor a. D. in Köln.

Infolge der Schleusungen treten in Schiffahrtskanälen wandernde Wellen auf. Während des Durchlaufs der Wellen heben oder senken sich die Wasserspiegel in den Schleusenvorhöfen sowie in den Kanälen, und gleichzeitig beobachtet man an den im allgemeinen ruhenden Wassermassen Strömungen in der einen oder der anderen Längsrichtung. Bei gleichen Kanal-Querschnitten sind die Wasserspiegeländerungen und Strömungen von der Größe der Schleusenkammer und insbesondere von der größten sekundlichen Abflußmenge, mit der die Füllung oder Entleerung der Schleusen erfolgt, abhängig. Werden solche Kanäle gleichzeitig als Zu- und Ableitungen zu Wasserkraftwerken benutzt, so werden auch durch plötzliche Änderungen in der Beaufschlagung der Turbinen wandernde Wellen verursacht, welche die Wirkung der Schleusungswellen verstärken können. Wenn auch die allgemeinen theoretischen Grundlagen für die Berechnung solcher Wellen bekannt sind, so treten dabei doch schwer erfäßbare Nebenwirkungen auf, so daß eine Nachprüfung an der Natur und durch Modellversuche geboten ist. Im folgenden sollen daher zunächst Versuche über Schleusungswellen beschrieben werden, die am Wesel-Datteln-Kanal in den Jahren 1938 und 1940 von der Wasserstraßendirektion Münster bzw. dem Wasserstraßenamt Dorsten durchgeführt wurden.

I. Die Versuche am Wesel-Datteln-Kanal.

1. Grundlagen der Versuche:

Der im Jahre 1930 in Betrieb genommene Wesel-Datteln-Kanal hat den in Abb. 1 dargestellten Normalquerschnitt mit 91,62 m². Die 5 Schleusen sind einfache Schleppzugschleusen von 225 m Nutzlänge und 12 m Breite mit annähernd senkrechten Kammerwänden. Die Gefälle betragen zwischen 9 m (Schleuse Dorsten) und 4 m (Schleuse Flaesheim), die Längen der Haltungen liegen zwischen 3 und 17 km. Zur Speisung des westdeutschen Kanalsystems sind an jeder der 5 Schleusenstufen Pumpwerke errichtet, die vom Rhein her Speisungswasser über den Kanal der Scheitelhaltung Herne—Datteln—Münster zuführen. Bei Pumpbetrieb treten also Strömungen im Kanal auf, welche die durch die Schleusungen verursachten Wasserströmungen verstärken oder abschwächen. Um auch diese Einflüsse zu erfassen, wurden die Versuche sowohl bei Stillstand der Pumpen als auch bei voller und halber Beaufschlagung durchgeführt. Sie wurden an 3 Sonntagen jedesmal über mehrere Stunden ausgedehnt, wobei die Schifffahrt ruhte, so daß die Versuchsergebnisse nicht durch die Schifffahrtswellen beeinträchtigt sind. Da an den 3 Versuchstagen (13. u. 20. 11. 1938 und 25. 8. 1940) kein Wind oder nur sehr schwacher Wind herrschte, ist auch der sonst häufig beobachtete Windstau ausgeschaltet.

Als Versuchsstrecke diente an allen 3 Tagen die 11,2 km lange unterste Haltung zwischen den Schleusen Friedrichsfeld und Hünxe, die mit Ausnahme des kurz oberhalb der Schleuse Friedrichsfeld liegenden Hafens der staatlichen Betriebswerkstatt keine seitlichen Häfen oder ähnlichen Erweiterungen hat. Der Einfluß der geringen Vergrößerung der Spiegelbreiten in den Krümmungen kann bei der Auswertung der Versuche vernachlässigt werden.

Das Gefälle der Schleuse Friedrichsfeld ist von den Rheinwasserständen, die sich in ihrem Unterwasser einstellen, abhängig; es betrug an den beiden Versuchstagen des Jahres 1938 = 8,00 m und an dem Meßtag 1940 = 6,30 m. Bei 232,50 m Gesamtlänge und 12,50 m mittlerer Breite der Schleusenammer ergibt sich der Inhalt zu $232,50 \times 12,50 \times 8,00 = 23\ 250\ \text{m}^3$ bzw. $18\ 300\ \text{m}^3$.

Die Schleuse Hünxe hatte an allen 3 Tagen das gleiche Gefälle von 6 m. Mit 232,50 m Länge und 12,40 m mittlerer Breite beträgt der Kammerinhalt demnach $232,50 \times 12,40 \times 6,00 = 17\ 300\ \text{m}^3$.

Die Füllung und Entleerung der Schleusen erfolgt durch je 6 in den Hubtoren angeordnete Schützen von zusammen $14,16\ \text{m}^2$ Durchflußquerschnitt je Tor.

Die Schützhubkurven sind bei Erbauung der Schleusen so aufgestellt, daß einerseits durch möglichst große sekundliche Wassermengen die Gesamtzeit für Füllung oder Entleerung einer Kammer einen Kleinstwert erreicht, ohne daß dabei andererseits in der Schleuse oder in den Vorhäfen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, die die Schifffahrt gefährden könnten. Die beiden Zielen genügende Kurve ist zunächst durch eingehende Modellversuche¹⁾ ermittelt und dann im praktischen Betrieb überprüft und endgültig festgelegt worden.

Die Hubgeschwindigkeit dieser Schützen wird über Kurvenscheiben und Leonardumformer zwangsläufig gesteuert, so daß, solange sich nicht das Gefälle einer Schleuse ändert, Gesamtdauer und zeitlicher Verlauf für jede Füllung bzw. Entleerung die gleichen bleiben, während sonst bei Schleusen, bei denen die Betätigung der Umlaufverschlüsse von der Erfahrung des Bedienungspersonals abhängt, mehr oder weniger große Unterschiede unvermeidlich sind.

Beim Entleeren der Schleuse Hünxe steigt die sekundliche Wassermenge in $4\frac{1}{2}$ Minuten von 0 auf $45\ \text{m}^3/\text{sek.}$ allmählich an, bleibt dann $2\frac{1}{2}$ Minuten auf dieser Höhe, um dann in weiteren $3\frac{1}{2}$ Minuten wieder auf fast 0 abzufallen (Abb.2).

Bei der Schleuse Friedrichsfeld ändert sich das Gefälle mit den Rheinwasserständen, ohne daß die Kurvenscheiben ausgewechselt werden. Es sind daher auch die sekundlichen Füll- und Entleerungsmengen von den wechselnden Gefällhöhen abhängig. Während bei den Versuchen am 13. und 20. 11. 1938 die größte Füllmenge ca. $50\ \text{m}^3/\text{sek.}$ betrug, wurden am 25. 8. 1940 nur $35\ \text{m}^3/\text{sek.}$ als Größtwert erreicht.

Die Pumpwerke an den Schleusen Friedrichsfeld und Hünxe sind mit je 4 Pumpen von je $3,14\ \text{m}^3/\text{sek.}$ Förderleistung ausgerüstet.

In Betrieb waren

am 13. 11. 1938	4 Pumpen mit zus.	$12,56\ \text{m}^3/\text{sek.}$
„ 20. 11. 1938	0 „ „ „	0 $\text{m}^3/\text{sek.}$
„ 25. 8. 1940	2 „ „ „	$6,28\ \text{m}^3/\text{sek.}$

¹⁾ „Die Wasserberuhigungseinrichtungen der umlauflosen Schiffsschleusen des Wesel-Datteln-Kanals“ Oberreg.- u. Baurat Bock u. Reg.-Baurat Dr. Natermann. Bau-technik 1928, Heft 12 S. 158 usf.

Bei 91,62 m² wasserführendem Kanalquerschnitt betrug daher die nach Osten, d. h. bergwärts gerichtete Strömung

am 13. 11. 1938	$\frac{12,56}{91,62}$	= ca. 0,14 m/sek.
„ 20. 11. 1938		= 0
„ 25. 8. 1940	$\frac{6,28}{91,62}$	= ca. 0,07 m/sek.

Die Pumpen wurden an den Versuchstagen jeweils 3 Stunden vor Beginn der Versuche in Betrieb genommen, damit sich der Kanalwasserspiegel bereits dem der Pumpströmung entsprechenden Gefälle anpassen konnte.

2. Die Messungen.

Gemessen wurden sowohl Wasserstände als auch Strömungsgeschwindigkeiten. Die Wasserstände wurden alle 2 Minuten an Lattenpegeln abgelesen, die in der Nähe des Ufers aufgestellt waren. Ein Kranz von Tauchbohlen von ca. 1 m im Geviert sicherte die ruhige Lage des Wasserspiegels.

Die Messung der Geschwindigkeiten erfolgte an jeder Beobachtungsstelle durch einen Meßflügel, der zwischen 2 verankerten Prähmen aufgehängt war. Gemessen wurde in Kanalmitte, und zwar etwa 1,50 m unter dem Wasserspiegel. Die gemessenen Werte sind daher größer als die mittlere Geschwindigkeit des ganzen Querschnitts, ihr Verhältnis zu diesen Werten wurde nicht bestimmt und kann daher nur aus ähnlichen Messungen geschätzt werden. Der Flügel lief jeweils 100 Sekunden und die Durchschnittsgeschwindigkeit in dieser Zeit ist als Ergebnis der Messung genommen. 20 Sekunden wurden zum Umschalten benötigt. Spitzenwerte mit einer Dauer von weniger als 100 Sekunden sind demnach nicht erfaßt.

3. Die Versuchsergebnisse.

Vor der Auswertung der Versuchsergebnisse dürfte eine kurze Darlegung der grundlegenden Gesetze für die Entstehung und Fortpflanzung solcher Wellen zweckmäßig sein.

Bei der Entleerung einer Schleusenkammer hebt sich der Wasserspiegel im unteren Vorhafen um ein gewisses Maß. Diese Hebung wandert mit der Wellengeschwindigkeit durch den Vorhafen bis sie in den Kanal eintritt. Gleichzeitig entsteht in dem vorher stromlosen Vorhafen eine Wasserströmung in Richtung auf den Kanal. Ein derartiger Schwall soll im folgenden als „Füllschwall“ bezeichnet werden, im Gegensatz zu einem „Stauschwall“, der auftritt, wenn eine vorhandene Strömung in einem Kanal plötzlich abgebremst wird, wie dies z. B. in einem Kraftwasserkanal bei schnellem Abschluß der Turbinen der Fall sein würde.

Wird dagegen eine Schleusenkammer gefüllt, so tritt im Oberwasser ein Sunk auf, der wieder mit Wellengeschwindigkeit in Richtung Kanal wandert. Die Wasserströmung hat hier jedoch die entgegengesetzte Richtung, nämlich zur Schleuse hin. Der Sunk möge „Entnahmesunk“ heißen im Gegensatz zu einem „Absperrersunk“, der z. B. im Unterwasser eines Wasserkraftwerkes bei plötzlicher Entlastung oder Abschluß der Turbinen entsteht²⁾.

In Kanälen, die nur der Schifffahrt dienen und keine oder nur eine geringe, sich nur allmählich ändernde Wassergeschwindigkeit haben (wie z. B. bei Speisung), haben wir es nur mit Füllschwall und Entnahmesunk zu tun. Dagegen können in Kanälen, die für Schifffahrt und Krafterzeugung gemeinsam

²⁾ Diese Bezeichnungen sind m. W. zuerst von Forchheimer geprägt worden.

benutzt werden, alle 4 Arten eintreten und sich gegenseitig verstärken oder abschwächen.

Ist eine Schwallwelle durch die Kanalhaltung gelaufen, so wird sie am anderen Haltungsende reflektiert. Dabei verdoppelt sich im Reflexionsgebiet die Schwallhöhe, während die Geschwindigkeiten sich umkehren. In diesem Bereich heben sie sich demnach auf. Die Welle läuft dann als reflektierte Welle wieder zur ersten Schleuse zurück. Trifft sie dabei mit einem neuen, von dort kommenden Schwall zusammen, so laufen die beiden Wellen durcheinander. Dabei addieren sich im Begegnungsbereich die Wellenhöhen und die gegeneinander gerichteten Strömungsgeschwindigkeiten heben sich auf.

Dasselbe gilt auch für die Reflexion und die Begegnung von 2 Sunkwellen. Trifft jedoch ein von der oberen Schleuse kommender Füllschwall mit einem Entnahmesunk aus der unteren Schleuse zusammen, so heben sich im Begegnungsbereich die Hebungen und Senkungen der Wasserspiegel auf, während sich die gleichgerichteten Strömungsgeschwindigkeiten addieren.

Die beschriebenen Erscheinungen sind an den Versuchsergebnissen gut zu verfolgen. Betrachten wir z. B. die auf Abbildung 3 und 4 dargestellten Ergebnisse der Versuche am 20. 11. 1938, bei denen keine Pumpen liefen, also vor Beginn der Versuche keine Strömung im Kanal herrschte.

Der durch die Entleerung der Schleuse Hünxe (Untertor km 13,2) um 8.15 Uhr ausgelöste erste Füllschwall trifft an der Meßstelle km 12,2 um 8.20 Uhr ein, wobei der Kanalspiegel um ca. 18 cm steigt. (Der Scheitel ist, wie der Vergleich mit der zweiten Schwallwelle zeigt, durch die Beobachtung offenbar nicht erfaßt.) Im Kanal tritt gleichzeitig eine nach Westen, also talwärts gerichtete Strömung auf, deren Größtwert 0,425 m/sek. erreicht. Bei der nächsten Meßstelle km 9,7 trifft der Schwall um 8.28 Uhr ein, seine Höhe erreicht ca. 16 cm (wahrscheinlich infolge Beobachtungsfehler auf 17 cm zu ergänzen). Wir beobachten dann den Schwall um 8.35 Uhr bei km 7,3 mit der größten Höhe von 13 cm, die Strömung beträgt 0,33 m/sek. Bei km 4,9 hat der Schwall noch eine größte Höhe von 14 cm, sein Abbau erfolgt schneller und mit steilerem Abfall, da er sofort in einem Sunk übergeht. An der Meßstelle km 2,5 ist der Schwall nur noch an einer geringen Hebung des Wasserspiegels zu erkennen, da er sofort von einem von der Schleuse Friedrichsfeld um 8.45 Uhr ausgegangenen Entnahmesunk aufgenommen wird. Auch dieser erreicht infolge des Zusammentreffens nur eine Tiefe von 9 cm. Die gleichgerichteten Strömungsgeschwindigkeiten von Schwall und Sunk addieren sich jedoch, der Größtwert beträgt 0,47 m/sek. Dieser Wert würde noch größer sein, wenn die Meßstelle km 2,5 den gleichen Kanalquerschnitt hätte wie die Meßstellen km 12,2 und 7,3. Tatsächlich beträgt aber die Wasserspiegelbreite bei km 2,5 statt der normalen Breite von 34,50 m mehr als 40 m und die Vergrößerung des Kanalquerschnitts muß sich in einer Verminderung der Wassergeschwindigkeit auswirken.

Auf den Sunk folgt unmittelbar wieder ein niedriger Schwall, der offenbar durch den Rücklauf des an der Schleuse Friedrichsfeld reflektierten Schwalles verursacht wird.

Der Sunk 1 erreicht bei der Meßstelle km 4,9 eine größte Tiefe von 17 cm und bei km 7,9 eine solche von 15 cm, die Strömungsgeschwindigkeit ist hier mit 0,33 m/sek. gleich der des Schwalles 1. Der Sunk kreuzt dann im Weiterlauf zwischen km 7,3 und 12,2 den inzwischen von Schleuse Hünxe um 9.00 Uhr ausgelösten Füllschwall 2, wobei sich Sunk und Schwall nahezu ausgleichen. An der Meßstelle km 12,2 hat der Sunk wieder 13 cm Tiefe gegenüber dem Ausgangsspiegel und eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,28 m/sek. Er wird dann an der Schleuse Hünxe reflektiert und trifft auf dem Rücklauf bei

km 12,2 mit dem von Friedrichsfeld zurückkommenden Schwall 1 zusammen. Bei geringer Wasserspiegeländerung tritt dabei eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,28 m/sek. auf, die aber im Gegensatz zu den bisher besprochenen Strömungen die Richtung nach Osten, also bergwärts hat.

Besonders klar ist das Zusammentreffen von Schwall und Sunk bei km 12,2 um 10.10 Uhr zu beobachten, wo der von Hünxe kommende Füllschwall 3 mit dem Entnahmesunk 2 von Friedrichsfeld zusammentrifft. Während sich dabei die Hebungen und Senkungen der Wasserspiegel nahezu ausgleichen, steigt die Strömungsgeschwindigkeit auf 0,67 m/sek., also auf fast das Doppelte der bei Schwall 1 und 2 beobachteten Werte. Auch um 12.10 Uhr, 14.10 und 15.10 Uhr treten derartige Begegnungen zwischen Schwall und Sunk ein, desgleichen bei km 7,3 um 11.30, 13.30 und 16.30 Uhr, wo ebenfalls Wassergeschwindigkeiten bis 0,65 m/sek. beobachtet werden. Die größte nach Osten gerichtete Strömung zeigt sich bei km 7,3 um 12.11 Uhr mit 0,37 m/sek., ihre Ursache ist das Zusammentreffen eines rücklaufender Schwalles mit einem ebenfalls rücklaufenden Sunk. Der Kanalspiegel ändert sich dabei nur unwesentlich. Auf Abb. 3 sind so die einzelnen Schwall- und Sunkwellen mit ihren Reflexionen und Begegnungen untersucht und durch Richtungspfeile gekennzeichnet. Das auf den ersten Blick verwirrende Bild von unterschiedlichen Wasserspiegeländerungen und Strömungen enthüllt so die ihm innewohnende Gesetzmäßigkeit. Dabei treten in dem Kanal folgende Größtwerte auf:

Größte Schwallhöhe	20 cm (km 12,2 um 9.12 Uhr)
Größte Sunktiefe	28 cm (km 2,5 um 12.20 Uhr)
Größte Strömung nach Westen	0,68 m/sek. (km 12,2 um 10.10 Uhr)
Größte Strömung nach Osten	0,36 m/sek. (km 7,3 um 12.11 Uhr)

Die Abb. 5 zeigt den Versuch am 13. 11. 1938, an dem die Pumpwerke der Schleusen Friedrichsfeld und Hünxe mit je 4 Pumpen in voller Tätigkeit waren. Entsprechend der von Westen nach Osten fließenden Pumpmenge von 12,56 m³/sek. müßte die mittlere Fließgeschwindigkeit im Kanal 0,14 m/sek. betragen. Tatsächlich gemessen wurde vor Beginn des Schleusenbetriebes bei km 12,2 eine bergwärts gerichtete Strömung von 0,18 m/sek. und bei km 7,3 eine solche von 0,17 m/sek. Der geringere Wert bei km 2,5 erklärt sich aus dem dort vorhandenen größeren Kanalquerschnitt. Der Unterschied zwischen der theoretischen mittleren Geschwindigkeit von 0,14 m/sek. gegenüber den bei km 12,2 und 7,3 gemessenen Werten dürfte ohne weiteres dadurch seine Erklärung finden, daß die Wassergeschwindigkeit nur an einem Punkt des Querschnitts gemessen und damit nicht die mittlere Geschwindigkeit erfaßt wurde.

Als Folge der Pumpströmung sind die nach Osten gerichteten Wassergeschwindigkeiten der Schleusungswellen größer, die nach Westen gerichteten kleiner als die am 20. 11. 1938 ohne Pumpbetrieb gemessenen. Im übrigen ist der Verlauf der Spiegelschwankungen an beiden Versuchstagen der gleiche, ein Beweis dafür, daß sie nur durch die Schleusungen verursacht und nicht durch andere Einflüsse gestört sind.

Als Größtwerte sind dabei festgestellt:

Größte Schwallhöhe	16 cm (km 12,2 um 9.12 Uhr)
Größte Sunktiefe	33 cm (km 2,5 um 12.26 Uhr)
Größte Strömung nach Westen	0,57 m/sek. (km 12,2 um 10.11 Uhr)
Größte Strömung nach Osten	0,58 m/sek. (km 12,2 um 9.37 Uhr)

Zum Vergleich sei hier auch der am 25. 8. 1940 durchgeführte Versuch erwähnt, bei dem die Pumpwerke halb beaufschlagt waren und mit je 2 Pumpen liefen. Entleerung und Füllung der Schleusen erfolgten zu denselben Zeiten wie an den Versuchstagen des Jahres 1938, der Kanalspiegel

stand jedoch um ca. 10 cm höher und der Inhalt der Schleusenammer Friedrichsfeld betrug infolge des höheren Rheinwasserstandes nur 18 300 m³ gegenüber 23 250 m³.

Gemessen wurden folgende Größtwerte:

Größter Schwall	21 cm (km 12,2 um 8.13 Uhr)
Größte Sunktiefe	26 cm (km 6,4 um 8.54 Uhr)
Größte Strömung nach Westen	0,66 m/sek. (km 12,2 um 9.13 Uhr)
Größte Strömung nach Osten	0,37 m/sek. (km 12,2 um 9.19 Uhr)

Unter dem Einfluß des Pumpbetriebes werden, wie zu erwarten war, die nach Osten gerichteten Strömungen verstärkt und die nach Westen gerichteten geschwächt, wobei das Maß der Vergrößerung oder Verkleinerung etwa der Pumpströmung entspricht. Ein Vergleich der größten Wasserspiegeländerungen ergibt folgendes Bild:

Pumpen in Betrieb:	0	2	4
Größte Schwallhöhe	20 cm	21 cm	16 cm
Größte Sunktiefe	28 cm	26 cm	33 cm

Eine einheitliche Tendenz auf Zu- oder Abnahme der Änderungen ist hieraus nicht abzuleiten, zumal es sich um Einzelwerte handelt. Vergleicht man für die einzelnen Meßstellen das Ausmaß der Wasserspiegeländerungen zwischen den 3 Versuchstagen, so sind wesentliche und charakteristische Verschiedenheiten in dem Verhalten der Wasserspiegel zwischen den 3 Tagen nicht festzustellen. An allen 3 Versuchstagen ist die größte Schwallhöhe kleiner als die größte Sunktiefe.

4. Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Wellen.

Aus den Abb. 3—5 läßt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen ermitteln. Aus den Ankunftszeiten der Wellenscheitel ist auf Abb. 6 die gemittelte Laufgeschwindigkeit aller Schwall- und Sunkwellen am 20. 11. 1938 aufgetragen. Der Schwallscheitel trifft 11 Minuten nach Beginn der Entleerung der Schleuse Hünxe bei km 12,2 ein und legt den 9700 m langen Weg von dort bis km 2,5 in $42 - 11 = 31$ Minuten zurück, entsprechend einer Laufgeschwindigkeit von 5,20 m/sek. Der Sunkscheitel erreicht km 2,5 11 Minuten nach Beginn der Füllung der Schleuse Friedrichsfeld, er braucht für die 9700 m bis km 12,2 die Zeit von $43 - 11 = 32$ Minuten. Die Laufgeschwindigkeit ist mit 5,04 m/sek. also etwas kleiner als die des Schalles. Abb. 6 zeigt ferner die Wellengeschwindigkeit am 13. 11. 1938, an dem an beiden Schleusen 4 Pumpen in Betrieb waren. Dabei betrug die Geschwindigkeit der Schwallwelle 4,90 m/sek., die der Sunkwelle 5,21 m/sek. Der Schwall lief demnach etwas langsamer und der Sunk etwas schneller als am 20. 11. 1938. Die Pumpströmung läuft dem Schwall entgegen und vermindert daher dessen absolute Geschwindigkeit, während sie die des gleichgerichteten Sunkes erhöht. Es mag zunächst auffallen, daß zwischen dem Beginn der Entleerung bzw. Füllung der Schleusen und dem Eintreffen der Scheitel an dem nächstgelegenen Meßpunkt (z. B. ist km 12,2 ca. 1000 m von Schleuse Hünxe entfernt) die verhältnismäßig lange Zeit von ca. 11 Minuten vergeht, während man nach der oben erläuterten Wellengeschwindigkeit im Kanal ein früheres Eintreffen erwarten sollte. Die Erklärung hierfür werden wir später sehen.

5. Form der Einzelwelle.

Für die nähere Untersuchung der einzelnen Wellen sind auf Abb. 7 einige der ersten Schwallwellen aufgetragen, soweit sie noch nicht durch entgegenkommende Sunkwellen beeinflusst sind. Man kann nämlich die Pegelganglinie als Spiegelbild der Welle ansehen, wenn die Länge gleich dem Produkt aus Zeit mal Wellengeschwindigkeit gewählt wird, da dieses Produkt ja den

Weg darstellt, den die Welle in der für ihren Durchlauf gemessenen Zeit zurückgelegt hat. Ebenso lassen sich die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten entzerren und der leichteren Diskussion zugänglich machen. Um zufällige Beobachtungsfehler auszuschalten, wie sie z. B. beim Durchgang der ersten Schwallwelle durch km 12,2 (Spitze nicht gemessen) vorliegen, sind möglichst mehrere Schwallwellen übereinander aufgetragen. Dabei ergibt sich:

a) Die Wellen steigen in flacher Neigung an und erreichen einen höchsten Scheitelwert von 20 cm. Die größte Steigung beträgt etwa $\frac{0,15}{1750 \text{ m}} = \frac{1}{8500}$, was etwa dem Gefälle im Unterlauf unserer schiffbaren Ströme entspricht und für die Schifffahrt keinerlei Schwierigkeiten bietet. Der Rücken der Welle ist noch flacher. Da zwischen dem Durchgang des Fußpunktes der Welle und dem des Scheitels ca. 5–6 Minuten liegen, beträgt die Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels $\frac{0,20}{560} = 0,07 \text{ cm/sek.}$, also kaum die Hälfte bis ein Drittel der in neuzeitlichen Schleusen üblichen Steiggeschwindigkeit.

b) Der Inhalt der Schwallwelle ist bei 5600 m Länge und 0,09 m mittlerer Höhe mal Wasserspiegelbreite = $5600 \cdot 0,09 \cdot 34,50 = 17\,400 \text{ m}^3$, also etwa gleich dem Inhalt der Schleuse Hünxe ($17\,300 \text{ m}^3$).

c) Auch die Strömungsgeschwindigkeiten, die im Kanal bei Durchgang der Welle auftreten, steigen langsam auf den Höchstwert von ca. 0,40 m/sek. an und fallen dann langsam wieder ab. Da die Scheitel sehr flach sind, kommt bei einem Schleppzug nicht nur der Schlepper oder ein Anhang allein in den Bereich der Strömung, sondern es wird der ganze Schleppzug von ihr erfaßt. Ein Schleppzug mit 3 Anhängen und einer Gesamtlänge von ca. 600 m würde, wenn er z. B. eine Schwallwelle bei km 12,2 passiert, auf seiner ganzen Länge eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,35 m/sek. zu überwinden haben. Auf Abb. 8 sind für die Schwallwellen, bei denen die höchsten Wassergeschwindigkeiten nach Westen oder nach Osten beobachtet wurden, Diagramme der Geschwindigkeiten aufgetragen. Hier würde der nach Osten fahrende Schleppzug auf seiner ganzen Länge eine Gegenströmung von mehr als 0,60 m/sek. vorfinden, d. h. etwa 35 v. H. seiner normalen Eigengeschwindigkeit. Da die Strömungen bei Schwall und Sunk die gleiche Richtung zu Tal haben, erleidet ein zu Berg fahrendes Fahrzeug durch die Schleusungswellen eine geringe Verzögerung, die dagegen wieder dem Talfahrer zugute kommt. Bei dem Rücklauf der reflektierten Wellen kehren sich überdies die Strömungsrichtungen um (Abb. 8 b), so daß Gewinn und Verlust sich praktisch ausgleichen werden.

d) Die Scheitelhöhen der Schleusungswellen nehmen bei ihrem Lauf durch den Kanal allmählich ab.

Verfolgt man in der gleichen Form die erste Sunkwelle auf ihrem Lauf durch den Kanal, so ergibt sich, daß Größe und Form an den einzelnen Beobachtungsstellen erheblich voneinander abweichen. Da der Sunk 30 Minuten später ausgelöst wird als der Schwall, trifft er schon kurz nach seinem Entstehen an der ersten Beobachtungsstelle bei km 2,5 (Abb. 4) mit diesem zusammen und kommt daher nicht zur vollen Ausbildung. Der Schwall wird dann an der Schleuse Friedrichsfeld zurückgeworfen, läuft auf dem Rücklauf unmittelbar hinter dem Sunk her und bewirkt dadurch ein schnelles Wiederanstiegen des Wasserspiegels. Dieser rücklaufende Schwall ist an der Meßstelle km 7,3 deutlich um 9.20 Uhr an der nach Osten gerichteten Strömung zu beobachten. Die größte Sunktiefe beträgt hier etwa 15 cm, während an der vorher liegenden Beobachtungsstelle, km 4,9 noch eine Tiefe von ca. 17 cm beobachtet wurde. Bei der Meßstelle km 9,7, trifft der Sunk mit dem inzwischen in Hünxe ausgelösten Schwall 2 zusammen, und es treten daher nur un-

wesentliche Änderungen des Wasserspiegels ein. Auch bei der folgenden Meßstelle, km 12,2, ist keine unbeeinflusste Beobachtung möglich, da sich hier schon die Reflexion an der Schleuse Hünxe bemerkbar macht. Da infolge dieser störenden Einflüsse die Gesetzmäßigkeit in Form und Größe der Sunkwelle nicht so klar zum Ausdruck kommt, wie bei dem betrachteten Schwall, ist hier von einer Einzeldarstellung des Sunkes abgesehen worden. Im allgemeinen trifft das, was bei dem Schwall hinsichtlich Neigung und Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels sowie der Strömungsgeschwindigkeit gefunden wurde, auch für den Sunk zu.

6. Frühere Versuche am Wesel-Datteln-Kanal.

In Ergänzung zu den vorbeschriebenen Versuchen sei hier auf frühere Versuche hingewiesen, die an verschiedenen Schleusen des Wesel-Datteln-Kanals ausgeführt worden sind³⁾. Während die bisher betrachteten Versuche dem praktischen Betrieb entsprechen, wurden damals in den betreffenden Haltungen nur 1 oder 2 Wellen erzeugt, so daß ihr Verhalten unbeeinflusst durch weitere Wellen beobachtet werden konnte. Ein dieser Veröffentlichung entnommener und auf Abb. 9 unter a) dargestellter Wellenzug zeigt den Hin- und Rücklauf eines einzelnen Füllschwalles durch die 3 km lange Haltung Datteln-Ahsen. Beim Entleeren der Schleuse Datteln (7,5 m Gefälle, Dauer 11 Minuten) tritt im Unterwasser ein Füllschwall auf, dessen Form derjenigen gleicht, die bei den Versuchen 1938 und 1940 beobachtet wurde. Der Scheitel erreicht ca. 18 cm über Ausgangsspiegel, läuft zur nächsten Schleuse Ahsen und kehrt von dort nach 20 Minuten mit der vergrößerten Scheitelhöhe von 24 cm zurück. Die Scheitelhöhe bleibt bei Rückkehr des zweiten Wellenberges nach weiteren 20 Minuten annähernd erhalten und klingt dann allmählich ab, wobei nach 4 Stunden Gesamtdauer der Ausgleich erfolgt. Die Haltung hat sich dabei um 14 cm erhöht, da ja kein Abfluß erfolgt. Die Wellengeschwindigkeit beträgt ca. 5 m/sek.

Bei dem weiteren unter b) der Abb. 9 dargestellten Versuch am 17. 3. 1931 wurden gleichzeitig die Schleuse Datteln entleert und die Schleuse Ahsen gefüllt. Der Schwall am Unterpegel Datteln tritt 10 Minuten nach Beginn der Entleerung mit ca. 10 cm Höhe ein und wird nach weiteren 10 Minuten mit 16 cm Höhe an der Schleuse Ahsen beobachtet. Auf dem Rücklauf zur Schleuse Datteln trifft er dort 10 Minuten später mit 17 cm Höhe ein. Der Sunk entsteht im Oberwasser der Schleuse Ahsen mit ca. 8 cm, trifft 10 Minuten später an Schleuse Datteln mit ca. 17 cm ein und kehrt nach weiteren 10 Minuten mit 11 cm Tiefe zur Schleuse Ahsen zurück. Zu derselben Zeit, wo ein Schwall an der einen Schleuse eintrifft, wird an der anderen Schleuse ein Sunk beobachtet. Der weitere Verlauf zeigt, daß der Sunk etwas hinter dem Schwall zurückbleibt, da der letztere eine etwas größere Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat. Die Wellengeschwindigkeit beträgt ca. 5 m/sek., die Auspiegelung erfolgt wieder nach ca. 4 Stunden.

II. Rechnungsmäßige Ermittlung von Schleusungswellen.

1. Form und Größe einer Einzelwelle.

Nach der Darstellung der Versuche und ihrer Ergebnisse soll im folgenden geprüft werden, ob und inwieweit die für die rechnerische Bestimmung solcher

³⁾ „Bewährung der Füll- und Entleerungseinrichtungen an den Schleusen des Wesel-Datteln-Kanals“ Oberreg.- u. Baurat Baertz, Münster, und Reg.-Baurat Knoke, Duisburg, Bautechnik Jahrg. 10 Heft 54 v. 16. 12. 1932.

Wellen bekannten Formeln mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen⁴⁾⁵⁾.

Es möge hier zunächst ein Füllschwall beobachtet werden. Dabei soll bezeichnen (Abb. 10):

- z die Hebung bzw. Senkung des Wasserspiegels in m
 c die Geschwindigkeit, mit der die Welle fortschreitet in m/sek.
 v die dabei zeitweise auftretende Strömungsgeschwindigkeit in m/sek.
 B_0 die normale Spiegelbreite des Kanals bzw. des Vorhafens in m
 B die Spiegelbreiten entsprechend z in m
 B_m die mittlere Spiegelbreite $\frac{B_0 + B}{2}$ in m
 F_0 der normale Querschnitt des Kanals bzw. des Vorhafens in m^2
 F die Querschnitte entsprechend z in m^2
 F_m die mittlere Querschnittsfläche $\frac{F_0 + F}{2}$ in m^2
 ΔF die Fläche der Hebung bzw. Senkung = $z \cdot B_m$ in m^2
 q die dem Kanal in der Zeiteinheit zugeführte bzw. entnommene Wassermenge in $m^3/\text{sek.}$

Es ist dann:

$$q = v \cdot F = z \cdot B_m \cdot c$$

Ist l die Gesamtlänge des Schwalls, so muß ferner sein:

$$z \cdot B_m \cdot l = Q = \text{Inhalt der Schleusenammer.}$$

Ist q bekannt, so ergibt sich die Schwallhöhe aus $z = \frac{q}{B_m \cdot c}$

Die Wellengeschwindigkeit c ergibt sich aus der Bewegungsgleichung

$$\gamma \cdot F \cdot z + \gamma \cdot \frac{z}{2} \Delta F = \frac{\gamma \cdot F \cdot c}{g} \quad \times \quad v$$

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \quad \times \quad \text{Beschleunigung}$$

$$\text{zu } c = \sqrt{g \cdot \frac{F_m}{B_m}}$$

Letztere Formel gilt nur für Wellen, deren halbe Wellenlänge größer ist als die Wassertiefe und bei denen die Geschwindigkeitsänderungen den ganzen Kanalquerschnitt erfährt und nicht auf die Wasseroberfläche oder deren nähere Umgebung beschränkt bleibt. Diese Bedingung ist jedoch bei den hier zu betrachtenden Wellen sowohl in reinen Schiffahrtskanälen als auch in Kanälen für gemeinsame Schiffahrts- und Kraftwerksbetrieb stets erfüllt.

Herrscht in dem Kanal schon vor Auftreten der Welle eine Wassergeschwindigkeit u , so ist die absolute Wellengeschwindigkeit

$$c' = c \pm u$$

wo $+$ gilt, wenn c und u gleiche Richtung haben und $-$, wenn sie entgegengesetzt laufen.

⁴⁾ „Die Wirkung der Schleusen auf den Wasserstand und die Wasserbewegung in den Haltungen“ v. Dr.-Ing. H. Krey, Zeitschrift d. Deutschen Wasserwirtschafts- u. Wasserkraftverbandes 1. Jahrg. Heft 5, August 1921.

⁵⁾ Schleicher, Taschenbuch für Bauingenieure 1943, Seite 127.

Für einen Entnahmesunk gelten ähnliche Überlegungen:

$$q = v \cdot F = z \cdot B_m \cdot c$$

$$c = \sqrt{g \cdot \frac{F_m}{B_m}}; c' = c \pm u$$

$$z \cdot B_m \cdot l = Q$$

In Tabelle 1 ist für den Normalquerschnitt des Wesel-Datteln-Kanals (Abb. 1) eine zahlenmäßige Berechnung durchgeführt. Da v und z zunächst unbekannt sind, werden zweckmäßig für z verschiedene Werte, z. B. 0,05; 0,10; 0,15 m usw. angenommen und hierfür die Werte F , B , B_m , F_m bestimmt. Die während des Wellendurchgangs im Kanal bewegte sekundliche Wassermenge ergibt sich dann aus $q = z \cdot B_m \cdot c$ und die zugehörige Strömungsgeschwindigkeit aus $q = F \cdot v$. Wenn, wie im vorliegenden Fall, der Schleusenabfluß bekannt ist, können z , c und v für die jeweilige Füll- bzw. Entleerungswassermenge bestimmt werden. Bei der Ermittlung ist zunächst angenommen, daß vor Beginn des Schleusenbetriebes der Kanal strömungslos war. Das Ergebnis ist auf Abb. 11 in einem Diagramm gezeigt, aus dem bei gegebenem q die Werte z und v abgelesen werden können. Für $q = 40 \text{ m}^3/\text{sek.}$ ergibt sich z. B. eine Schwallhöhe $z = 0,22 \text{ m}$ und eine Strömungsgeschwindigkeit $v = 0,40 \text{ m/sek.}$

In der gleichen Weise ist ein Entnahmesunk berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 11 nach unten aufgetragen.

Die Tabelle 2 enthält die Werte, die sich ergeben, wenn im Kanal außer den durch die Schleusungswellen erzeugten Strömungen eine von Westen nach Osten, also bergwärts gerichtete Wassergeschwindigkeit herrscht, wie sie dem Vollbetrieb der Pumpwerke entspricht. Auch diese Werte sind in dem Diagramm Abb. 11 eingetragen.

Während der Pumpbetrieb die Wasserspiegeländerungen nur unwesentlich beeinflusst, werden die Strömungsgeschwindigkeiten um annähernd die vollen, dem Pumpbetrieb entsprechenden Wassergeschwindigkeiten verkleinert oder vergrößert. Da die Pumpströmung der durch Füllschwall oder Entnahmesunk erzeugten Strömung entgegenläuft, werden bei den ursprünglichen Schleusungswellen die resultierenden Wassergeschwindigkeiten kleiner als ohne Pumpbetrieb, während sie bei den rücklaufenden Wellen, bei denen sich die Strömungsrichtung umkehrt, größer werden. Abb. 11 enthält dann noch die entsprechenden Werte für die Vorhäfen.

Auf Abb. 12 ist der Umriss einer Schwallwelle dargestellt, wie sie sich nach dem Diagramm aus der Füllkurve der Schleuse Hünxe (Abb. 2) ergeben würde, und zwar in Kurve a) für den Vorhafen und in Kurve b) für den normalen Kanalquerschnitt. Der Vergleich mit den aus den Versuchen auf Abb. 7 gefundenen Formen zeigt erhebliche Unterschiede. Es müssen also noch weitere, bisher in der Rechnung nicht erfaßte Einflüsse auf die Wellenform einwirken. Diese sind:

- a) Einfluß der Vorhäfen,
- b) Einfluß der Wandreibung,
- c) Formänderungen infolge der Ungleichheit der Wellengeschwindigkeit.

Zu a) Einfluß der Vorhäfen:

Die Welle entsteht zunächst im Vorhafen, dessen Querschnitt von dem des Kanals erheblich abweicht. (Ein gemittelter Querschnitt des unteren Vorhafens Hünxe ist auf Abb. 1 dargestellt.) Nach dem Diagramm, Abb. 11, entspricht dabei der größten Schleusungsmenge von $45 \text{ m}^3/\text{sek.}$ eine Wasserspiegelhebung

$z = 0,11$ m. Wenn die Welle mit dieser Höhe den Kanal erreicht, kann zunächst nur derjenige Teil des Zuflusses in den Kanal eintreten, der dieser Höhe z entspricht, also nur etwa $18 \text{ m}^3/\text{sek}$. Die restlichen $45 - 18 = 27 \text{ m}^3/\text{sek}$. werden reflektiert und füllen dabei den Vorhafen auf, bis die für $45 \text{ m}^3/\text{sek}$. Abfluß im Kanal erforderliche Höhe z erreicht ist. Dabei erleidet der Schwall eine Verzögerung und formt sich in ähnlicher Weise um, wie dies bei einer Hochwasserwelle geschieht, die durch ein Rückhaltebecken läuft. Die Größe des Vorhafens hat also ebenso wie der Gesamthalt der Schleusenkammer einen erheblichen Einfluß auf die Form der Schwallwelle.

Es bezeichnen:

- 0 die Oberfläche des Vorhafens in m^2
- $q_{t_0}; q_{t_1}$ die aus der Schleuse dem Vorhafen zufließende Wassermenge zur Zeit t_0 bzw. t_1 in m^3/sek .
- $t_1 - t_0 = \Delta t$ das beobachtete Zeitintervall in Sekunden
- q_{z_m} mittlerer Zufluß im Zeitintervall $= \frac{q_{t_0} + q_{t_1}}{2}$ in m^3/sek .
- $q_{a_0}; q_{a_1}$ die aus dem Vorhafen in den Kanal fließende Wassermenge z. Z. t_0 bzw. t_1
- q_{a_m} mittlerer Abfluß aus dem Vorhafen in den Kanal im Zeitintervall $= \frac{q_{a_0} + q_{a_1}}{2}$
- $z_0; z_1$ jeweilige Schwallhöhen im Kanal zur Zeit t_0 bzw. t_1 in m
- $O \cdot x$ die im Vorhafen im Zeitintervall Δt zurückgehaltene Wassermenge in m^3 .

$$z_1 = z_0 + x; \quad O \cdot x = \Delta t (q_{z_m} - q_{a_m})$$

$$q_{z_m} = c \cdot B_m \cdot \frac{z_0 + z_1}{2};$$

$$2 \cdot O \cdot x = \Delta t \cdot [(q_{t_0} + q_{t_1}) - c \cdot B_m \cdot (z_0 + (z_0 + x))]$$

c und B_m sind aus dem Diagramm Abbildung 11 zu entnehmen.

Für eine Schwallwelle ist die zahlenmäßige Berechnung durchgeführt und das Ergebnis auf Abb. 12 in den Kurven c und f aufgetragen. Die Werte der Kurve f sind dabei aus den z -Werten der Kurve c nach dem Diagramm der Abb. 11 ermittelt.

Die umgeformte Welle liegt demnach, wie zu erwarten war, zwischen den Umrissen, die früher für den Kanalquerschnitt und den Vorhafen ermittelt waren. Der Scheitel der umgeformten Welle bleibt unter der Kurve a , dafür wird die Welle erheblich länger. Während die Entleerung der Schleuse nach Abb. 2 nur $10\frac{1}{2}$ Minuten dauert, liegt zwischen Anfang und Ende der umgeformten Welle ein Zeitraum von 20 Minuten. Dem Vorhafen strömen aus der Schleuse maximal $45 \text{ m}^3/\text{sek}$., und zwar ca. 2,5 Minuten lang zu, demgegenüber beträgt die größte Abflußmenge im Kanal nur $32 \text{ m}^3/\text{sek}$. und auch dies nur für kurze Zeit. Die Welle erreicht den Scheitelpunkt ca. 8 Minuten nach Beginn der Schleusenentleerung. Dies ist auch die Erklärung für die unter I 4 erwähnte Beobachtung, daß der Wellenscheitel bei km 12,2 erst 11 Minuten nach Beginn der Entleerung eintrifft. Da der Wellenfuß für den 1000 m langen Weg bis km 12,2 etwa $\frac{1000}{5} = 200 \text{ Sek.} = \text{ca. } 3 \text{ Minuten}$ braucht, ergibt sich für den Scheitel $3 + 8 = 11$ Minuten.

Für das Ausmaß der Wellenumformung ist das Verhältnis zwischen dem durch die Oberfläche bestimmten Rückhaltevermögen des Vorhafens und dem Kammerinhalt andererseits maßgebend. Es beträgt im vorliegenden Fall $\frac{45000 \text{ m}^3 \cdot 0,20}{17400} = \text{ca. } 0,5$. Bei einem kleineren Kammerinhalt (z. B. geringes Gefälle) würde bei sonst gleichen Verhältnissen der Wellenscheitel noch niedriger werden, während er andererseits bei größerem Kammerinhalt sich dem Größtwert der Kurven mehr nähern würde, wenn er ihn auch auf keinen Fall überschreitet. Bestätigt wird dies auch durch die schon erwähnten früheren Versuche an anderen Haltungen des Wesel-Datteln-Kanals.

Dabei ergab sich nach der unter I 6 genannten Quelle:

Beobachtete Schwallkurven im Unterwasser der Schleusen:

Schleuse	Datteln	Flaesheim	Dorsten
Gefälle	7,50 m	4,0 m	9,0 m
Kammerinhalt	21 200 m ³	11 500 m ³	26 200 m ³
Dauer der Entleerung	11 Minuten	7 Minuten	11 Minuten
Schwallscheitel in Höhe tritt auf	16 cm	13 cm	21 cm
	nach Ende der Entleerung	nach 5 Min.	nach 8 Min.

Beobachtete Sunkkurven im Oberwasser der Schleusen:

Schleuse	Ahsen	Dorsten	Hünxe
Gefälle	7,0 m	9,0 m	6,0 m
Kammerinhalt	20 300 m ³	26 200 m ³	17 400 m ³
Sunktiefe	16 cm	22 cm	14 cm

Trotzdem bei allen genannten Schleusen die größte Entnahme- oder Füllmenge gleich ist, weisen sowohl die Höhen der Scheitel untereinander als auch die Tiefen der Sunke erhebliche Unterschiede auf und nehmen mit der Größe des Kammerinhaltes zu.

Die theoretisch ermittelte Kurve c ist in Abb. 8 den bei dem Versuch am 20. 11. 38 tatsächlich beobachteten Schwallwellen gegenübergestellt. Die Übereinstimmung in Form und Inhalt ist recht gut, im ganzen scheint die Welle etwas nach hinten verschoben. Auch die Kurve der aus den z-Werten der Kurve c über das Diagramm ermittelten theoretischen Wassergeschwindigkeiten weicht nur wenig von der Messung ab. Die Erklärung für das zeitliche Zurückbleiben der theoretischen Kurve wird sich später ergeben.

Zu b) Einfluß der Wandreibung:

Der Einfluß der Wandreibung auf die Schleusungswellen äußert sich in zweifacher Weise, und zwar einmal dadurch, daß die Form der Welle schon bei ihrer Entstehung etwas verändert wird und ferner durch allmählichen Verzehr der Energie der Welle, die so allmählich abgebaut und schließlich ganz zum Verschwinden gebracht wird. Dabei hängt der Reibungswiderstand nicht von der Wellengeschwindigkeit, sondern von der erheblich kleineren Wassergeschwindigkeit ab.

Läuft ein Schwall mit der Wellengeschwindigkeit c und der entsprechenden Wassergeschwindigkeit v durch den Kanal, so hat er dabei einem Reibungswiderstand zu überwinden, den Krey in der erwähnten Veröffentlichung annähernd zu $W = \frac{1 \cdot v^2 \cdot B}{k^2}$ ansetzte.

k ist der Beiwert der Formel $v = k \cdot \sqrt{R \cdot J}$

Die Bewegungsgleichung nimmt demnach die Form an:

$$\gamma \cdot F \cdot z + \gamma \cdot \frac{z}{2} \cdot \Delta F - \frac{\gamma \cdot 1 \cdot v^2 \cdot B}{k^2} = \frac{\gamma}{g} \cdot F \cdot c \cdot v$$

Daraus ergibt sich mit

$$v^2 = \frac{z^3 \cdot B_m^2 \cdot c^2}{F^2} \text{ und } F \cdot v = z \cdot B_m \cdot c$$

$$c_R = \frac{\sqrt{g \frac{F_m}{B_m}}}{1 + \frac{g \cdot l \cdot B \cdot B_m \cdot z}{k^2 \cdot F^2}}$$

In Tabelle 3 ist die Berechnung für die Schwallwelle, die bisher ohne Berücksichtigung der Reibung ermittelt war, durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 12 als Kurve d eingetragen. Durch die Reibung wird demnach die Schwallhöhe mit ca. 20 cm etwa 2 cm größer und der Abfall der Welle erfolgt etwas langsamer. Bei einem Sunk würde sich entsprechend die Sunktiefe etwas vergrößern und der Wiederanstieg würde etwas langsamer erfolgen. Da der Einfluß der Reibung von der Länge der Welle abhängt, wird er bei langen Wellen, d. h. größeren Kammerinhalten stärker sein als bei kurzen. Im ganzen bleibt er jedoch gering und wird im allgemeinen vernachlässigt werden können, wenn nicht außergewöhnliche Verhältnisse wie z. B. besonders große Kammerinhalte vorliegen.

Erheblicher wirkt die Reibung dagegen auf den allmählichen Abbau der Wellen bei ihrem Lauf durch den Kanal ein. Bevor jedoch dies näher untersucht wird, möge kurz die Wirkung der Wellengeschwindigkeit auf die Form der Wellen erläutert werden.

Zu c) Einfluß der Wellengeschwindigkeit auf die Form einer Welle:

In der Formel $c = \sqrt{g \frac{F_m}{B_m}}$ ist $\frac{F_m}{B_m}$ etwa proportional der Wassertiefe T. Die

Wellengeschwindigkeit c nimmt also mit wachsendem T zu, so daß die höheren Teile der Welle etwas schneller laufen, als die tieferen. (Aus Abb. 6 sahen wir z. B., daß der Schwall schneller läuft als der Sunk.) Auch innerhalb einer Einzelwelle treten daher während des Laufes durch den Kanal innere Verschiebungen auf, und zwar muß bei der Schwallwelle der Kopf steiler werden und der Scheitel weiter nach vorn rücken, während bei einem Sunk das Gegenteil der Fall ist. Nach Tabelle 1 beträgt für $z = 0$ die Wellengeschwindigkeit $c = 5,09$ m/sek. und für $z = 0,20 = 5,17$ m/sek. Die 11 km lange Haltung wird von der Welle in etwa $\frac{11000}{5,14} = \text{ca. } 2000$ Sek. durchlaufen. Dabei würde sich der Wellenscheitel gegenüber dem Fußpunkt um $(5,17 - 5,09) \cdot 2000 = 0,08 \cdot 2000 = 160$ m nach vorn verschoben haben. Im Vergleich zur Gesamtlänge der Welle von ca. 5600 m ist diese Verschiebung so gering, daß sie praktisch kaum in Erscheinung tritt und bei der rechnerischen Vorausbestimmung von Wellenformen vernachlässigt werden kann. Immerhin kann sie eine Erklärung dafür geben, daß, wie wir unter a) sahen, die theoretisch ermittelte Schwallwelle gegenüber der tatsächlich beobachteten etwas zurückbleibt.

Auch in einem einzelnen Kanalquerschnitt ist die Wellengeschwindigkeit nicht über die ganze Wasserspiegelbreite gleich, da ja die Wassertiefe nach den Ufern zu abnimmt. In der Mitte des Kanals laufen demnach die Wellen schneller als am Rande, so daß auch hierdurch die ursprüngliche Welle allmählich umgeformt werden muß. Dieser Einfluß ist jedoch rechnerisch nicht zu erfassen. Die gute Übereinstimmung der ohne seine Berücksichtigung er-

mittelten Wellenform mit der tatsächlich beobachteten läßt jedoch den Schluß zu, daß die Wirkung dieses Einflusses nur gering sein kann.

2. Einfluß der Reibung auf den Abbau der Wellen.

Es bleibt nun noch die Frage zu prüfen, wie die Reibung die Energie der Welle allmählich verzehrt und diese selbst abbaut. Auch hierfür ist die Berechnung von Krey in der genannten Veröffentlichung angegeben:

Das gesamte Arbeitsvermögen einer Schwall- oder Sunkwelle beträgt

$$\mathcal{E} = \int_0^l \frac{\gamma}{g} \cdot F \, dl \cdot \frac{v^2}{2} + \int_0^l \gamma \cdot B_m \cdot dl \cdot \frac{z}{2}$$

wobei das 1. Integral die kinetische und das 2. die potentielle Energie darstellt. Mit

$$z = \frac{F \cdot v}{B_m \cdot c} = \frac{q}{B_m \cdot c} \text{ und } c = \sqrt{g \frac{F_m}{B_m}}$$

werden beide Integrale gleich, das gesamte Arbeitsvermögen einer Welle wird damit

$$\mathcal{E} = \int \frac{\gamma}{g} \cdot F \, dl \cdot v^2 = \int \gamma \cdot B_m \cdot dl \cdot z^2$$

Der Reibungswiderstand des fließenden Wassers auf der Strecke Δl kann annähernd gleich

$$W = \gamma \cdot F \cdot \Delta l \cdot J = \frac{\gamma \cdot \Delta l \cdot B}{k^2} \cdot v^2$$

gesetzt werden.

In der Zeit dt wird von dem Wellenteil Δl eine Reibungsarbeit geleistet.

$$-d\mathcal{E} = \frac{\gamma \cdot \Delta l \cdot B \cdot v^2}{k^2} \cdot v \cdot dt$$

Diese geht von dem Arbeitsvermögen der Welle dauernd verloren. Setzt man aus der Arbeitsgleichung für v seinen Wert

$$v = \left(\frac{g \cdot \mathcal{E}}{\gamma \cdot F \cdot \Delta l} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ein, so erhält man die Differenzialgleichung

$$\mathcal{E}^{-\frac{3}{2}} \cdot d\mathcal{E} = -\frac{g \cdot B}{F \cdot k^2} \sqrt{\frac{g}{\gamma \cdot F \cdot \Delta l}} \cdot dt$$

oder zwischen 0 und t integriert

$$\mathcal{E}^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{g \cdot B}{F \cdot k^2} \sqrt{\frac{g}{\gamma \cdot F \cdot \Delta l}} \cdot t + \mathcal{E}_0^{-\frac{1}{2}}$$

Dabei bedeutet \mathcal{E}_0 die ursprüngliche Wellenenergie bei der Entstehung. Setzt man nun wieder für \mathcal{E} bzw. \mathcal{E}_0 die Werte nach Gleichung

$$\mathcal{E} = \frac{\gamma}{g} \cdot F \cdot \Delta l \cdot v^2$$

ein, so erhält man die Wassergeschwindigkeit zu jeder beliebigen Zeit und an jeder beliebigen Stelle aus:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} + \frac{1}{2} \frac{g}{k^2} \frac{B}{F} \cdot t$$

Aus v ist z dann leicht zu berechnen bzw. aus dem Diagramm zu entnehmen. B und F sind zwar nicht konstant, sondern ändern sich mit z . Da die Änderungen bei den hier zu betrachtenden Wellen jedoch nicht erheblich sind, genügt es, mit Mittelwerten zu rechnen.

Eine zahlenmäßige Berechnung ist für eine Schwallwelle auf Tabelle 4 durchgeführt. Als Ausgangswerte sind dabei $z_0 = 18$ cm und $v_0 = 0,35$ m/sek. zugrunde gelegt, wie sie etwa dem Mittelwert der beiden auf Abb. 7 dargestellten ersten Schwallwellen km 12,2 am 20. 11. 1938 entsprechen. Die Werte für B , B_m und F sind aus Tabelle 1 bzw. dem Diagramm zu entnehmen. Das Ergebnis ist in Abb. 13 dargestellt. Man sieht, daß besonders am Anfang die Werte für z und v schnell durch die Reibung abgebaut werden. Zum Vergleich sind die Werte für z und v eingetragen, die den in Abb. 7 aufgetragenen Schwallwellen aus den Beobachtungen am 20. 11. 1938 entsprechen, d. h. von Wellen, die an den einzelnen Meßpunkten nicht durch entgegenkommende andere Wellen gestört sind. Es zeigt sich, daß die z -Werte gut mit den theoretisch ermittelten Kurven übereinstimmen. Daß die an den Stationen km 12,2 und 7,3 bei dem Versuch beobachteten v -Werte größer sind als die errechneten, liegt daran, daß bei dem Versuch, wie schon früher festgestellt wurde, nicht die mittleren Geschwindigkeiten für den ganzen Querschnitt erfaßt sind. Im übrigen zeigen auch die in Abb. 9 dargestellten Beobachtungen an der Haltung Datteln-Ahsen den allmählichen Abbau der Wellen.

Im ganzen stimmen die theoretischen Berechnungen von Schleusungswellen mit den gemachten Beobachtungen so gut überein, daß aus ihnen Form und Verhalten der Wellen genügend genau vorausbestimmt werden können. Wie wir gesehen haben, spielt dabei neben der Größe der sekundlichen Abflusmengen der Gesamthalt der Kammer und die Größe des Vorhafens eine wichtige Rolle. Auch erhebliche Kammerinhalte werden durch die Speicherung der Vorhäfen so umgeformt, daß sie für die Schifffahrt unschädlich werden. In demselben Sinne wirken auch Kanalverbreiterungen oder seitliche Häfen und Wasserflächen. Dabei ist es jedoch wichtig, daß die Verbindungen zwischen ihnen und dem Kanal genügend breit sind, da sonst beim Durchlauf der Wellen kräftige Seitenströmungen entstehen können, die für die Schifffahrt unbequem werden würden. So mußte an einem bestehenden Kanal, an dem eine seitliche große Wasserfläche durch eine schmale Verbindungsöffnung angeschlossen war, wegen derartiger Strömungen die Verbindung nachträglich verbreitert werden. Die Schleusungswellen, die in die Seitenfläche eintraten, wurden dort reflektiert und trafen bei ihrem Rücklauf am Kanal zu einem Zeitpunkt ein, an dem dort die Hauptwelle schon abgelaufen war. Die Folge war ein kräftiges Gefälle und eine für die Kanalschifffahrt lästige Seitenströmung.

Zur weiteren Nachprüfung für die durch solche Erweiterungen bewirkte Dämpfung von Schleusungswellen wurde am 24. 4. 1948 ein Versuch an der Haltung Ahsen-Flaesheim des Wesel-Datteln-Kanals durchgeführt. Etwa 1200 m oberhalb der Schleuse Flaesheim ist dort an den Kanal ein ca. 6,5 ha großes Kiesbaggerloch angeschlossen. Während einer Füllung der Schleuse Flaesheim wurden kurz vor und hinter ca. 50 m breiten Abzweigung die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Da Meßflügel nicht

zur Verfügung standen, konnten die Geschwindigkeiten nur durch Schwimmermessung bestimmt, d. h. nur die Oberflächengeschwindigkeiten und Durchschnittswerte über die gesamte Meßdauer gefunden werden.

Es ergab sich, daß vor der Abzweigung sowohl die Absenkungen des Kanalspiegels als auch die Strömungsgeschwindigkeiten erheblich größer sind ($z = 11\frac{1}{2}$ cm, $v = 0,30$ m/sek.) als dahinter ($z = 9$ cm, $v = 0,12$ m/sek.). Behinderungen der durchgehenden Schiffahrt durch schädliche Seitenströmungen an der Abzweigstelle sind bisher nicht aufgetreten. Trotzdem dürfte bei der Anlage von Kanalhäfen, wenn man die Wirkung der Schleusungswellen betrachtet, den neuerdings auch aus anderen Gründen vielfach angewandten seitlichen Dreieckshäfen der Vorzug vor Stichhäfen zu geben sein.

Sind Kanäle mit Doppelschleusen ausgerüstet, so wird damit gerechnet werden müssen, daß beide Kammern gleichzeitig gefüllt oder entleert werden. Dabei verdoppeln sich die Abflußmengen und bei gleichem Kanalquerschnitt müssen auch die Spiegeländerungen und Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend anwachsen. Genügend große Vorhäfen sind deshalb auch aus diesem Grunde wichtig.

III. Kraftwerkswellen in Schiffahrtskanälen.

1. Entstehung der Wellen.

In Schiffahrtskanälen, die gleichzeitig auch als Zu- oder Ableitungen für Wasserkraftwerke dienen, treten außer den Schleusungswellen noch Wellen auf, die durch eine plötzliche Änderung in der Kraftwassermenge verursacht werden können. Es dürfte deshalb von Wert sein, auch diese Wellen einer kurzen Beobachtung zu unterziehen und dabei Abhilfemaßnahmen zu zeigen, die an ausgeführten Anlagen getroffen wurden, um solche Wellen auf ein für die Schiffahrt unschädliches Maß herabzusetzen.

Werden die Generatoren eines Wasserkraftwerkes plötzlich entlastet, z. B. beim Bruch der Freileitungsverbindung zum Netz, so sperren die automatischen Regler den Zufluß zu den Turbinen ab. Mit Rücksicht auf die Spannungsregelung werden die Schließzeiten der Regler immer recht kurz sein, d. h. 2 bis 4 Sekunden. Es tritt dabei im Oberwasser des Kraftwerkes ein Stauschwall und im Unterwasser ein Absperrstau auf. Der umgekehrte Fall einer plötzlichen Belastung aller Turbinen von 0 auf Vollast kommt praktisch nicht vor. In der Regel wird die Anordnung so sein, daß das Kraftwasser vom Wehr aus in einen gemeinsamen Kanal geführt wird, der sich dann in einer bestimmten Entfernung vor der Schleuse bzw. dem Kraftwerk in 2 Kanäle teilt, von denen der eine in den Vorhafen für die Schleuse übergeht und der andere zum Kraftwerk führt. (Z. B. Neckarstautufen Wieblingen und Ladenburg, Rheinseitenkanal Kembs.) Ebenso können sich die beiden Unterwasserkanäle wieder zu einem gemeinsamen Kanal vereinigen (z. B. Shannon-Kraftwerk, Irland). Wenn die vom Kraftwerk ausgehenden Wellen an den Trennpunkten der Kanäle ankommen, laufen sie einerseits in dem gemeinsamen Kanal weiter und treten andererseits auch in die nur der Schiffahrt dienenden Kanalteile und Vorhäfen ein. Dabei können die in diesen Kanalteilen entstehenden Stau- und Schwallwellen größer und für die Schiffahrt unbequemer werden als die in den gemeinsamen Kanälen entstehenden Wellen. Diese Vorgänge lassen sich gut an einem Modellversuch verfolgen, der z. Z. für das Shannon-Kraftwerk in Irland zur Vermeidung von Störungen der Schiffahrt durchgeführt wurde⁶⁾. Da dort vom Kraftwerk mehrere Freileitungen ab-

⁶⁾ „Modellversuche für die Schußrinne des Shannon-Kraftwerkes“ von Professor Dr. Ludin, Zeitschrift „Der Bauingenieur“ 9. Jahrg. 1928, Heft 11.

gehen, konnte damit gerechnet werden, daß von der Gesamtleistung des Kraftwerkes etwa die Hälfte plötzlich ausfallen könnte. Dabei würden durch die Turbinenregler innerhalb von 2 Sek. ca. 300 m³/sek. plötzlich abgesperrt werden, so daß im Oberwasser ein Stauschwall und im Unterwasser ein Absperrersunk von solcher Stärke auftreten würden, daß sie für die Schifffahrt nicht mehr tragbar gewesen wären. Nach dem Versuch am Modell im Maßstab 1:50 trifft z. B. der Absperrersunk an dem Punkt, wo sich der Unterkanal der neben dem Kraftwerk liegenden Schleuse wieder mit dem Kraftwerkskanal vereinigt, nach 28,5 Sekunden ein und erreicht dort nach weiteren 14 Sekunden seinen tiefsten Punkt mit 0,625 m, um dann mit kurzen Pendelschwingungen annähernd auf dieser Höhe zu bleiben. In dem gemeinsamen weiteren Verlauf des Kanals läuft der Sunk mit 9,25 m/sek. weiter und hat dabei nach weiteren 250 m noch eine Tiefe von 0,50 m. Die in den Schleusenunterkanal eintretende Sunkwelle erreicht das 280 m entfernte Untertor ca. 70 Sekunden nach dem Abschluß der Turbinen ($c = 6,75$ m/sek.). Die Sunktiefe an der Schleuse erreicht dabei aber 1,40 m, also mehr als das Doppelte der Absenkung an der Abzweigung, und die Senkungsgeschwindigkeit des Wasserspiegels steigt dabei auf 3,3 cm/sek. Diese starke Absenkung ist offenbar außer durch die Reflexion dadurch verursacht, daß sich im Schleusenunterkanal ein starker Sog einstellt und die vorher ruhende Wassermasse in Bewegung bringt. Dabei sinkt der Wasserspiegel an der Schleuse nicht nur entsprechend der Sunktiefe im Unterkanal ab, sondern schwingt darüber hinaus, bis er nach einiger Zeit wieder zurückschwingt und das Wasser wieder zur Schleuse hin zurückströmt.

Die Verhältnisse lagen bei dem Shannon-Kraftwerk besonders ungünstig, da die Kraftwassermenge verhältnismäßig groß ist und die Schleuse keinen unteren Vorhafen hat, der dämpfend wirken könnte. Das Beispiel zeigt aber, mit welchen Erscheinungen bei gemeinsamen Kraftwerks- und Schifffahrtsbetrieb gerechnet werden muß. Entscheidend ist dabei die Ausbaumassermenge des Kraftwerks bzw. diejenige Teilmenge, die plötzlich abgesperrt werden kann, wobei diese von der Aufteilung der Gesamtmenge auf die einzelnen Turbinen und der elektrischen Schaltung abhängt. Dabei wird auch zu untersuchen sein, ob die Schleusungswellen durch die Kraftwasserwellen verstärkt oder abgeschwächt werden. Im allgemeinen wird bei Flußkanalisierungen mit Seitenkanälen an einem Wehr jeweils nur eine Schleusen- und Kraftstufe hängen, so daß sich die Wirkungen der Schleusen- und Kraftwasserwellen nicht addieren (z. B. Neckarstau auf den Ladenburg- und Wieblingen). Sind jedoch an einem solchen gemeinsamen Schifffahrt- und Kraftkanal mehrere Stufen hintereinander geschaltet, so kann ein durch die Turbinen der Oberstufe verursachter Absperrersunk mit einem Entnahmesunk der Schleuse der Unterstufe zusammentreffen, desgl. ein Kraftwasserstauschwall der unteren Stufe mit einem Schleusenfüllschwall aus der Oberstufe. Dabei treten zwar keine Erhöhungen der Wassergeschwindigkeiten ein, aber es addieren sich die jeweiligen Wasserspiegeländerungen.

2. Mittel zur Abschwächung von Kraftwerkswellen.

Auch Kraftwerkswellen werden durch genügend große Vorbecken im Ober- und Unterwasser wirkungsvoll gedämpft. Darüber hinaus sind an manchen Stellen noch besondere Einrichtungen getroffen worden, von denen einige hier erwähnt seien.

Bei dem Shannon-Kraftwerk ist neben dem Kraftwerk ein Leerschluß angeordnet, der durch eine Segmentschütze verschlossen ist, die durch ein Fallgewicht in der Reglerschlußzeit von 2 Sekunden geöffnet wird. Dabei wird

schlagartig eine Wassermenge von ca. 120 m³/sek. freigegeben, d. i. ca. 1/3 derjenigen Menge, die durch die Turbinen plötzlich abgesperret wird. Wie die mit dieser Einrichtung durchgeführten Modellversuche zeigten, gelang es damit, den Sunk am Schleusenunterhaupt von 1,40 m auf 0,65 m, also um mehr als 50 v. H. herabzusetzen und die Strömung im Schleusenunterkanal erheblich zu ermäßigen. Bedingung ist dabei, daß das Öffnen des Leerschusses gleichzeitig mit dem Schließen der Turbinenleitapparate erfolgt, damit der Absperrunk der Turbinen bereits beim Entstehen kräftig gedämpft wird. Im vorliegenden Fall wird die Öffnungsbewegung für den Leerschuß über Relais von den elektrischen Vorgängen ausgelöst, die die Ursache für das Abschalten der Turbinen sind.

Eine andere Einrichtung ist von Dr.-Ing. Böß beschrieben⁷⁾.

Hier ist neben einem Kraftwerk, das in 3 Turbinen max. 18 m³/sek. ausnutzt, ein Heyn'scher Wasseregel (Heber) von 13 m³/sek. Leistung eingebaut. Zweck war hier, den Unterlieger von den Betriebsschwankungen des Kraftwerks unabhängig zu machen. An der fertigen Anlage wurden Versuche durchgeführt und dabei auch die Schwallwellen aufgenommen, die bei plötzlichem Abschluß der Turbinen unter der Wirkung des Hebers entstehen. Das Anspringen des Hebers wird durch den Schwall selbst ausgelöst und erfolgt schon bei 8 cm Schwallhöhe mit voller Leistung. Der Heber tritt 8 Sekunden nach Abschluß der Turbinen in Tätigkeit, baut den bis dahin im Oberwasser entstandenen Stauschwall sofort stark ab und führt ihn in 40 Sek. auf 6 cm zurück. Es entsteht also nur ein kurzer und in seiner Höhe stark verringerter Schwall. Da, wie die Betrachtung der Schleusenwellen zeigte, Schwall- und Sunkwellen in den Vorhäfen um so mehr abgeschwächt werden, je kürzer sie sind, können demnach auch solche Heber in Verbindung mit genügend großen Wasserflächen, wie sie im Ober- und Unterwasser von Kraftwerken meist vorhanden sind, wesentlich zur Dämpfung von Kraftwerkswellen beitragen.

IV. Einfluß der Wellen auf die Gestalt des Querschnitts und den Schutz des Ufers und der Sohle.

Den bei den Schleusungs- und Kraftwerkswellen auftretenden Änderungen des Wasserspiegels und der Wassergeschwindigkeiten muß bei der Bestimmung von Form und Größe des Kanalquerschnitts und bei der Wahl des Schutzes der Querschnittsbegrenzung Rechnung getragen werden.

1. Änderung des Wasserspiegels.

Das Steigen des Kanalspiegels, das außer durch die Schleusungs- und Kraftwerkswellen auch durch Windstau verursacht werden kann, berücksichtigt man bei neuzeitlichen Kanälen bei der Festlegung der Brückenunterkanten. Das ist besonders wichtig in der Nähe der Schleusen, da bei der Reflexion der Wellen die Spiegeländerungen sich im Umkehrbereich verdoppeln. Dieser Bereich ist gleich der halben Wellenlänge, im vorliegenden Falle des Wesel-Datteln-Kanals also $5600/2 = 2800$ m. Eine Erhöhung des Wellenscheitels tritt aber, wie wir gesehen haben, auch ein, wenn eine rücklaufende Welle einem neuen, von der oberen Schleuse kommenden Schwall begegnet. In kurzen Haltungen sind solche Begegnungen nicht nur häufiger als in langen, sondern es haben auch die sich begegnenden Wellen infolge der kürzeren Wege weniger Energie verloren, so daß kräftige Erhöhungen

⁷⁾ „Versuche an einem Heyn'schen Wasseregel bei der Wasserkraftanlage der Papierfabrik Schoeller & Hoesch in Gernsbach“ von Reg.-Baurat Dr.-Ing. Paul Böß, Baudtechnik, Jahrg. 11, Heft 33 vom 1. August 1933, S. 503—505.

der ursprünglichen Wellen die Folge sein können. Es ist daher besonders in kurzen Haltungen wichtig, der lichten Höhe der Brückenunterkanten über dem Kanalspiegel ein ausreichendes Sicherheitsmaß zuzuschlagen, und zwar nicht nur im Bereich der Schleusen, sondern auf der ganzen Haltungslänge.

Die beschriebenen Erscheinungen treffen mit veränderten Vorzeichen auch auf die Sunkwellen zu. Damit sich begegnende Schiffe auch dann, wenn sie von einem Sunk erfaßt werden, noch in der Nähe des Ufers genügend Spielraum unter der landseitigen Kimm vorfinden, muß der Kanal in Höhe der Böden beladener Schiffe eine genügende Breite haben. Dies ist selbst bei den neueren Kanälen nicht immer genügend beachtet. Die schon von anderer Seite im Hinblick auf den Schiffahrtsbetrieb vorgeschlagenen größeren Breiten für künftige Kanäle würden deshalb auch mit Rücksicht auf die Schleusungswellen von Nutzen sein, besonders in kurzen Haltungen, in denen die Sunktiefen bei Begegnungen von noch wenig geschwächten Wellen größer sein können, als in langen. Häufig pflegt man kurze Haltungen zwischen zwei Schleusen als verlängerte Vorhäfen zu betrachten und ihnen schon deshalb eine größere Breite zu geben. So hat auch die 3 km lange Haltung des Wesel-Datteln-Kanals zwischen den Schleusen Datteln und Ahsen statt der Normalbreite von 34,50 m eine Spiegelbreite von 46,50 m erhalten, und es ist wohl auch diesem Umstand mit zuzuschreiben, daß Schwierigkeiten, die auf die Schleusungswellen zurückzuführen wären, bisher nicht aufgetreten sind.

2. Änderung der Wassergeschwindigkeit.

Wie die Versuche zeigten, treten auch in Kanälen, die lediglich der Schiffahrt dienen und nicht ständig in der einen oder anderen Richtung durchströmt sind, unter der Wirkung der Schleusungswellen Wassergeschwindigkeiten auf, die am Wesel-Datteln-Kanal bis zu 0,70 m/sek. betragen. Dabei würden die Böschungen und die Sohle des Kanals, wenn sie aus leicht beweglichen Böden bestehen, angegriffen werden. Im allgemeinen erhalten jedoch solche Kanäle stets einen Uferschutz, da sie sonst schon durch die Bug- und Heckwellen der Schiffe beschädigt würden. Bei den neuzeitlichen deutschen Kanälen hat sich für einen solchen Uferschutz, der im allgemeinen von 1 m ober- bis 1 m unterhalb des Wasserspiegels reicht, ein 30 cm starker Steinwurf in einer Neigung von 1 : 2,5 bis 1 : 3 gut bewährt und als ausreichend bewiesen. Im Gegensatz zu den kurzen Bug- und Heckwellen der Schiffe steigen die langen Schleusungswellen nur ganz allmählich mit sehr flacher Steigung an, so daß durch sie verursachte Schäden bisher nicht beobachtet sind. Lediglich in unmittelbarer Nähe der Schleusen können beim schnellen Füllen und Entleeren der Kammern stärkere Angriffe auf die Uferbefestigung auftreten, die auf die dabei entstehenden Wirbel und stehenden Walzen zurückzuführen sind. Ein genügend widerstandsfähiger Schutz ist jedoch auch hier durch eine Packung von größeren Steinen oder Trockenpflaster leicht zu erreichen.

Während die Bug- und Heckwellen nur die seitlichen Böschungen des Kanals angreifen, wirken sich die durch die Schleusungswellen verursachten Wasserströmungen auf den ganzen Querschnitt, also auch auf die Sohle und die tiefer liegenden Böschungsteile aus. Bestehen diese aus leicht beweglichen Böden, so könnten sie durch die Strömung angegriffen und beschädigt werden. Der Betrieb mit Schraubenzugfahrzeugen, der bei den neueren Großschiffahrtskanälen die Regel sein dürfte, verlangt jedoch für solche Böden eine Auskleidung gegen die Angriffe des Schraubenzugwassers, die so widerstandsfähig ist, daß sie auch zusätzliche Angriffe, die durch die Schleusungswellen verursacht werden, aufnehmen kann. Ein lediglich durch die Schleusungswellen bedingter Schutz wird daher im allgemeinen nur in Ausnahmefällen notwendig werden.

Gefährlich können in Kraftwasserstraßen, die auch als Zu- und Ableitung für Wasserkraftwerke dienen, Wellen werden, die durch den Kraftwerksbetrieb verursacht werden. Bei plötzlichem Abschluß der Turbinen können sie Höhen von 1 m und mehr erreichen und durch die mit ihnen verbundene starke Sogwirkung zu Schäden an den Ufern und in ungünstigen Fällen auch zum Einsturz von Böschungen führen. Widerstandsfähige Ufersicherungen sind daher in diesen Fällen besonders wichtig.

V. Wirtschaftlicher Vergleich zwischen einem festen Schutz der Querschnittsbegrenzung und einer Vergrößerung des Querschnitts.

Werden in einem Kanal die Wassergeschwindigkeiten so groß, daß Beschädigungen der Kanalungrenzung (Böschung und Sohle) zu befürchten sind, so kann man dem entweder durch eine Vergrößerung des Kanalquerschnittes oder durch einen festen Schutz auf Böschung und Sohle begegnen.

Diese Frage möge am Beispiel des Wesel-Datteln-Kanals erörtert werden, wobei Preise zugrunde gelegt sind, wie sie in den Jahren 1938/39 bei Kanalbauten im Bereich der Wasserstraßendirektion Münster festgestellt wurden.

Soll die bei den Versuchen am Wesel-Datteln-Kanal beobachtete größte Wassergeschwindigkeit von etwa 0,70 m/sek., die für leicht bewegliche Böden (Sand, feiner Kies) zu groß sein würde, auf das hierfür zulässige Maß von 0,30 bis 0,40 m/sek. herabgesetzt werden, so müßte hierfür die Querschnittfläche des Kanals etwa verdoppelt werden. Demgegenüber würde es zweifellos wirtschaftlicher sein, die gefährdeten Teile der Kanalungrenzung mit einem festen Schutz zu versehen. Bei den westdeutschen Schiffahrtskanälen ist, soweit ein solcher außer in der Wasserlinie auch für die tiefer liegenden Böschungsteile und die Sohle zum Schutz gegen den Schraubenstrahl erforderlich war, im allgemeinen eine Steinschüttung von 30 cm Stärke verwendet worden, deren Kosten durchschnittlich 3,80 RM/m² betragen. Auch eine gleich starke Schüttung aus dem Abraum von Steinbrüchen mit rund 60 v. H. Steingehalt hat sich bei den Erweiterungsarbeiten des Dortmund-Ems-Kanals gut bewährt und würde auch da, wo in besonderen Fällen Angriffe durch die von Schleusungswellen verursachte Strömung zu befürchten wären, ausreichen. Die Kosten stellten sich hierfür auf durchschnittlich 2,70 RM/m². Da der Umfang des wasserbenetzten Querschnittes beim Wesel-Datteln-Kanal 37 m beträgt, würden für den laufenden Meter Kanallänge etwa 140,— DM bei 30 cm starker Steinschüttung, bzw. 100,— DM für eine Auskleidung mit Bruchabraum aufzuwenden sein. Demgegenüber sind die Kosten für 1 m³ Kanalaushub einschließlich Transport und Einbau bzw. Ablagerung im großen Durchschnitt zu 1,80 bis 2,00 DM anzusetzen, so daß für eine Verdoppelung des jetzt 91,63 m² betragenden Querschnitts rund 184,00 DM für den laufenden Meter Kanallänge aufzuwenden wären. Dabei ist angenommen, daß der Wasserspiegel des Kanals etwa in Geländehöhe liegt. In ungedichteten Strecken wird er im allgemeinen tiefer, d. h. etwa in Höhe des Grundwasserspiegels zu legen sein, wobei sich die Menge des erforderlichen Mehraushubes entsprechend vergrößern würde. Da mit Rücksicht auf die zulässige größte Böschungseigung es nicht möglich sein würde, die Querschnittsvergrößerung nur nach der Tiefe vorzunehmen, müßte gleichzeitig der Kanal verbreitert werden. Hierdurch würden noch zusätzlich Kosten für den Grunderwerb entstehen. Hat der Kanal eine Dichtungsschale, so müßte man auch die Kosten für deren Erweiterung berücksichtigen.

In den wohl seltenen Fällen, wo besondere Maßnahmen zum Schutz der Kanalungrenzung gegen die Wirkung der Schleusungswellen erforderlich werden, wird es daher wirtschaftlicher sein, Sohle und Wandungen mit einem

festen Schutz zu versehen. Wie wir gesehen haben, können solche Wellen aber auch durch eine Vergrößerung der Vorhäfen und den Anschluß seitlicher Wasserflächen wirkungsvoll herabgesetzt werden, wenn man nicht die sekundlichen Füll- und Entnahmemengen verringern und damit eine Verlängerung der Schleusungsdauer in Kauf nehmen will. Dabei hängt die Entscheidung darüber, welche dieser Mittel einzeln oder zusammen die zweckmäßigste und wirtschaftlichste Lösung ergeben, von den besonderen Umständen des einzelnen Falles ab, so daß allgemein gültige Regeln hierfür nicht gegeben werden können.

Zusammenfassung.

Die Betrachtung der am Wesel-Datteln-Kanal mit Schleusungswellen durchgeführten Versuche zeigte, daß für die Form solcher Wellen außer der sekundlichen Schleusungswassermenge auch der Inhalt der Schleusenkammer sowie die Größe der Schleusenvorhäfen eine ausschlaggebende Rolle spielen. Die durch die Speisungspumpwerke erzeugte Strömung wirkt sich praktisch nur auf die durch die Wellen erzeugte Wassergeschwindigkeit aus, der Einfluß auf die Wasserspiegeländerung ist unwesentlich. Die rechnerische Ermittlung von Schleusungswellen an Hand der hierfür entwickelten Formeln führt zu einem Ergebnis, das gut mit den Versuchsbeobachtungen übereinstimmt. In den Kanälen, die gleichzeitig als Kraftwasser- und Schiffahrtsstraßen dienen, können Wellen, die durch die Kraftwerke verursacht werden, die Wirkung der Schleusungswellen verstärken und zu Schwierigkeiten für die Schifffahrt führen. Einige ausgeführte Beispiele zeigten die Möglichkeit, derartige Kraftwerkswellen soweit zu dämpfen, daß sie für die Schifffahrt unschädlich werden. Nachdem dann weiter der Einfluß betrachtet wurde, den die Schleusungswellen auf die Gestalt des Kanalquerschnitts sowie auf den Schutz der Ufer und Sohle ausüben, wurde untersucht, ob da, wo besondere Maßnahmen in dieser Hinsicht notwendig werden, ein fester Schutz der Kanalumgrenzung wirtschaftlicher sein würde als eine Vergrößerung des Querschnitts.

Table 1

Berechnung von Schleusungswellen

a) eines Schwalles ohne Pumpbetrieb.

$$c = \sqrt{g \frac{Fm}{Bm}} ; \quad q = c \cdot Bm \cdot z ; \quad v = \frac{q}{F}$$

$$F = 91,63 \text{ m}^2 ; \quad B = 34,50 \text{ m}$$

z	0	5	10	15	20	25	30	cm
F	91,63	93,36	95,10	96,85	98,61	100,38	102,15	m ²
B	34,50	34,70	34,90	35,10	35,30	35,50	35,70	m
Bm	—	34,60	34,70	34,80	34,90	35,00	35,10	m
Fm	—	92,50	93,37	94,24	95,12	96,01	96,89	m ²
c	5,09	5,11	5,14	5,16	5,17	5,18	5,19	m/sek
q	0	8,84	17,50	26,95	36,20	45,35	54,60	m ³ /sek
v	0	0,095	0,184	0,278	0,368	0,452	0,534	m/sek

b) eines Sunkes ohne Pumpbetrieb.

z	0	5	10	15	20	25	30	cm
F	91,63	89,91	88,20	86,49	84,81	83,15	81,46	m ²
B	34,50	34,30	34,10	33,90	33,70	33,50	33,30	m
Bm	—	34,40	34,30	34,20	34,10	34,00	33,90	m
Fm	—	90,77	81,92	89,06	88,22	87,38	86,54	m ²
c	5,10	5,08	5,07	5,06	5,04	5,03	5,01	m/sek
q	0	8,75	17,40	26,00	34,40	42,80	51,00	m ³ /sek
v	0	0,098	0,197	0,301	0,405	0,514	0,625	m/sek

Tabelle 2

Berechnung von Schleusungswellen

a) eines Schwalles bei Betrieb von 4 Pumpen

$$c' = \sqrt{g \cdot \frac{Fm}{Bm}} - u ; v' = v - u ; u = \frac{12,56}{F} \text{ m/sek}$$

$$q = c' \cdot Bm \cdot z ; q' = q - 12,56 \text{ m}^3/\text{sek} ; F = 91,63 \text{ m}^2 ; B = 34,50 \text{ m}$$

z	0	5	10	15	20	25	30	cm
F	91,63	93,36	95,10	96,85	98,61	100,38	102,15	m ²
B	34,50	34,70	34,90	35,10	35,30	35,50	35,70	m
Bm	—	34,60	34,70	34,80	34,90	35,00	35,10	m
Fm	—	92,50	93,37	94,24	95,12	96,01	96,89	m ²
c	5,10	5,11	5,14	5,16	5,17	5,18	5,19	m/sek
u	0,135	0,134	0,132	0,129	0,127	0,125	0,123	m/sek
c'	4,863	4,98	5,01	5,03	5,04	5,06	5,07	m/sek
q	0	8,62	17,40	26,21	35,20	44,25	53,40	m ³ /sek
q'	-12,56	-3,94	4,84	13,65	22,64	31,69	40,84	m ³ /sek
v	-0,135	-0,04	0,051	0,141	0,234	0,315	0,40	m/sek

b) eines Sunkes bei Betrieb von 4 Pumpen

$$c' = \sqrt{g \cdot \frac{Fm}{Bm}} + u ; v' = v - u ; u = \frac{12,56}{F} \text{ m/sek}$$

$$v = \frac{q}{F} ; q' = q - 12,56 \text{ m}^3/\text{sek}$$

z	0	5	10	15	20	25	30	cm
F	91,63	89,91	88,20	86,49	84,91	83,15	81,46	m ²
B	34,50	34,30	34,10	33,90	33,70	33,50	33,30	m
Bm	—	34,40	34,30	34,20	34,10	34,00	33,90	m
Fm	—	90,77	89,92	89,06	88,22	87,38	86,55	m
c	5,10	5,08	5,07	5,06	5,04	5,03	5,00	m/sek
u	0,137	0,139	0,142	0,145	0,147	0,151	0,154	m/sek
c'	4,863	5,22	5,21	5,21	5,19	5,18	5,15	m/sek
q	0	8,95	17,90	26,70	35,30	44,00	52,50	m ³ /sek
q'	-12,56	-3,16	5,34	14,14	22,70	31,44	39,94	m ³ /sek
v'	-0,135	-0,035	0,059	0,164	0,268	0,378	0,491	m/sek

Einfluß der Reibung auf die Form einer Schwallwelle.

Tabelle 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Zeit nach Beginn der Welle sek	Δl m	c m/sek	B m	B mittel m	Bm m	Bm mittel m	F m ²	F mittel ₂ m ²	z m	z mittel m	k ²	$\frac{q}{k^2} \cdot \frac{\Delta l \cdot B \cdot Bm \cdot z}{F^2}$	1+SR ¹³	c _R m/sek	z _R m
0"		5,09	34,50		34,50		91,62		0,031					5,09	0
120"	610			34,50		34,50		91,62		0,034	2260	0,0127	1,013		
		5,14	34,50		34,50		91,62		0,037					5,07	0,038
270"	780			34,70		34,60		93,36		0,072	"	0,0336	1,047		
		5,17	34,90		34,70		95,10		0,107					4,93	0,108
480"	1090			35,10		34,80		96,85		0,143	"	0,0885	1,136		
		5,14	35,30		34,90		98,61		0,180					4,54	0,200
720"	1200			35,10		34,80		96,85		0,140	"	0,095	1,231		
		5,09	34,90		34,70		95,10		0,100					4,14	0,11
1170"	2260			34,70		34,60		93,36		0,059	"	0,076	1,307		
		5,09	34,50		34,50		91,62		0,018					3,90	0,022

c = Wellengeschwindigkeit ohne Berücksichtigung der Reibung
 z = Schwallhöhe " " " " "
 c_R = Wellengeschwindigkeit mit " " " " "
 z_R = Schwallhöhe " " " " "

$$= \frac{q}{Bm \cdot c_R} \cdot \frac{c}{1 + \frac{q}{k^2} \cdot \frac{\Delta l \cdot B \cdot Bm \cdot z}{F^2}}$$

Abbau einer Schwallwelle durch den Einfluß der Reibung.

Tabelle 4.

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} + \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{k^2} \cdot \frac{B}{F} \cdot t; \quad z = \frac{F \cdot v}{Bm \cdot c}$$

$$z_0 = 0,18 \text{ m}$$

$$k = 47,5 \quad k^2 = 2260$$

$$v_0 = 0,35 \text{ m/sek}$$

Nach Tabelle 1 ist für $z = 0$; $- 0,20$

$$c_{\text{mittel}} = \frac{5,09 + 5,17}{2} = 5,13 \text{ m/sek}$$

$$B = 34,50 \text{ m} \quad 35,30 \text{ m}$$

$$F = 91,63 \text{ m}^2 \quad 98,61 \text{ m}^2$$

$$B_m \text{ mittel} = \frac{34,50 + 34,90}{2} = 34,70 \text{ m}$$

$$\frac{g}{k^2} \cdot \frac{B}{F} = \frac{1,635}{1000} \quad \frac{1,543}{1000}$$

$$F_m \text{ mittel} = \frac{91,63 + 98,61}{2} = 95,12 \text{ m}^2$$

Mittelwert $\frac{1,588}{1000}$

Weglänge $l = t \cdot c_{\text{mittel}}$

Zeit	0'	5'	10'	15'	20'	30'	40'	50'	60'	1 St.20'	1 St.40'	2 St.	2 1/2 St.	3 St.	3 1/2 St.	4 St.
v m/sek	0,35	0,32	0,30	0,29	0,26	0,23	0,22	0,19	0,18	0,15	0,135	0,12	0,095	0,09	0,08	0,065
z m	0,18	0,171	0,16	0,155	0,140	0,125	0,120	0,105	0,10	0,08	0,075	0,065	0,051	0,05	0,04	0,035
Weglänge km	0	1,54	3,08	4,62	6,15	9,22	10,23	15,4	18,50	24,60	30,60	37,0	46,2	55,5	64,5	74,0

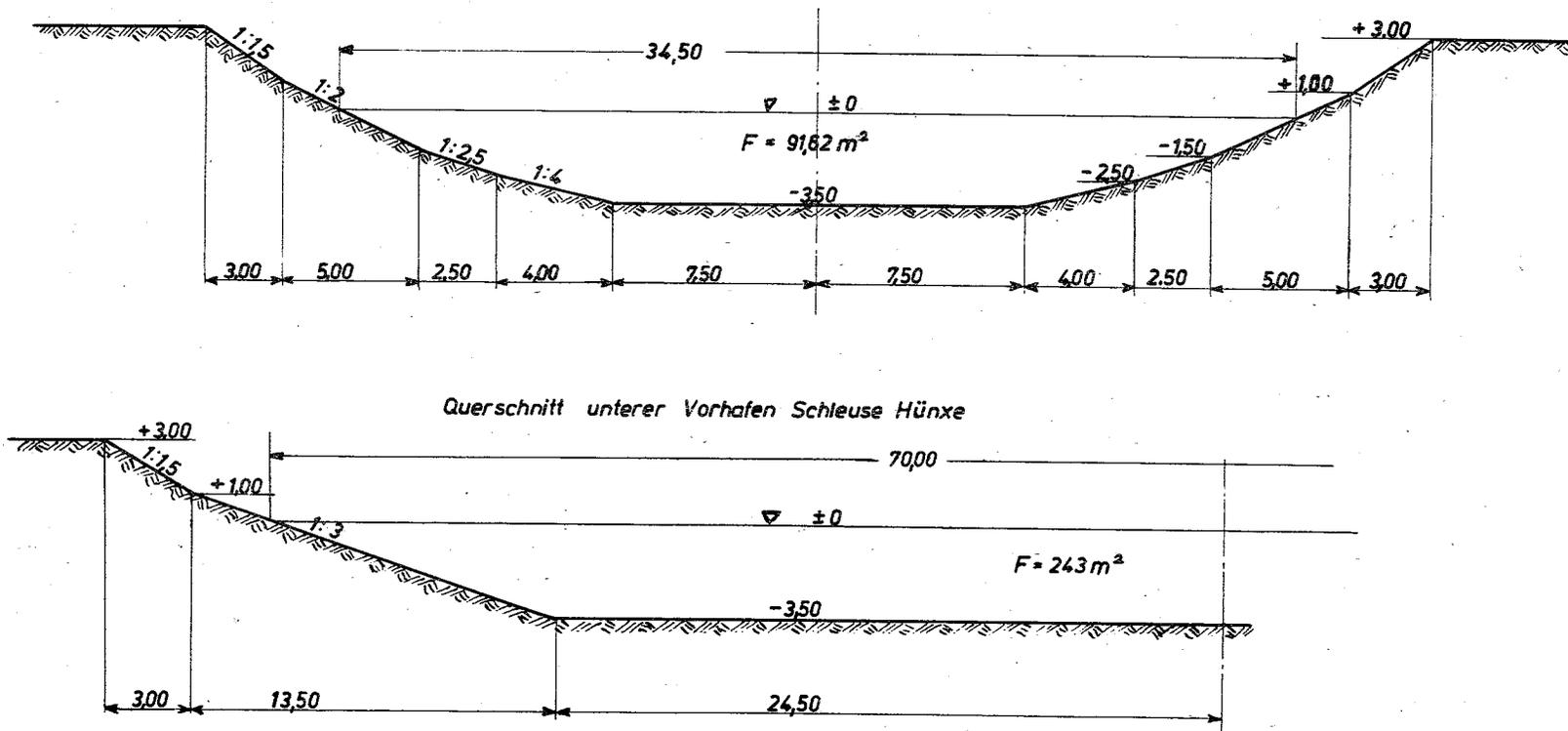
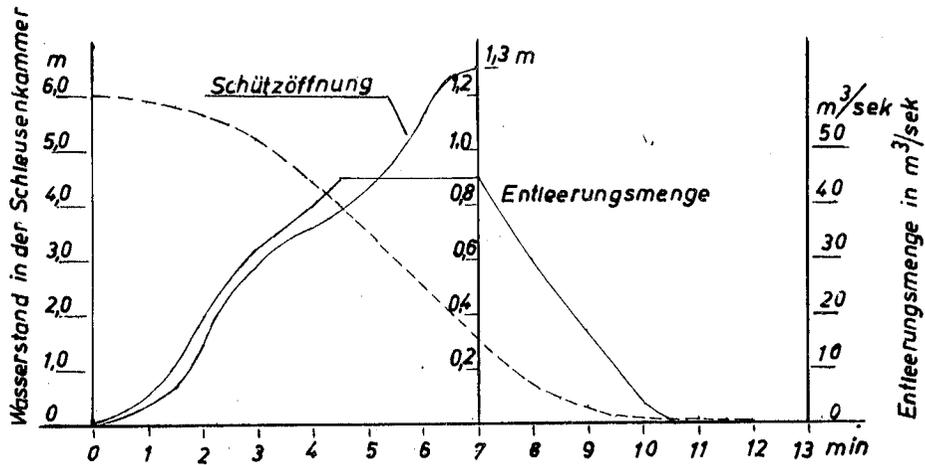


Abb. 1
Querschnitte des Wesel-Datteln-Kanals

Entleeren Schleuse Hünxe



Füllen Schleuse Friedrichsfeld

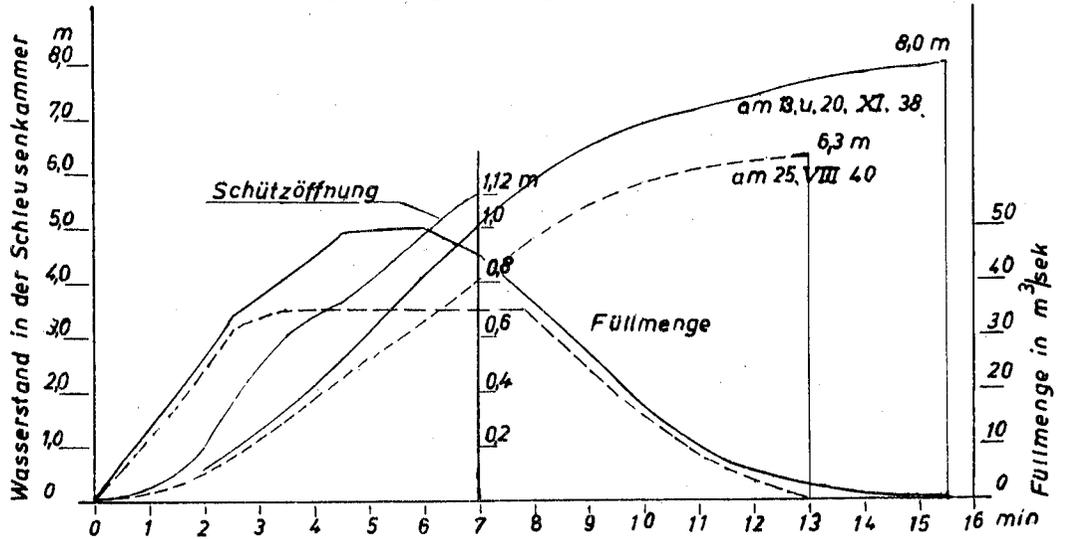


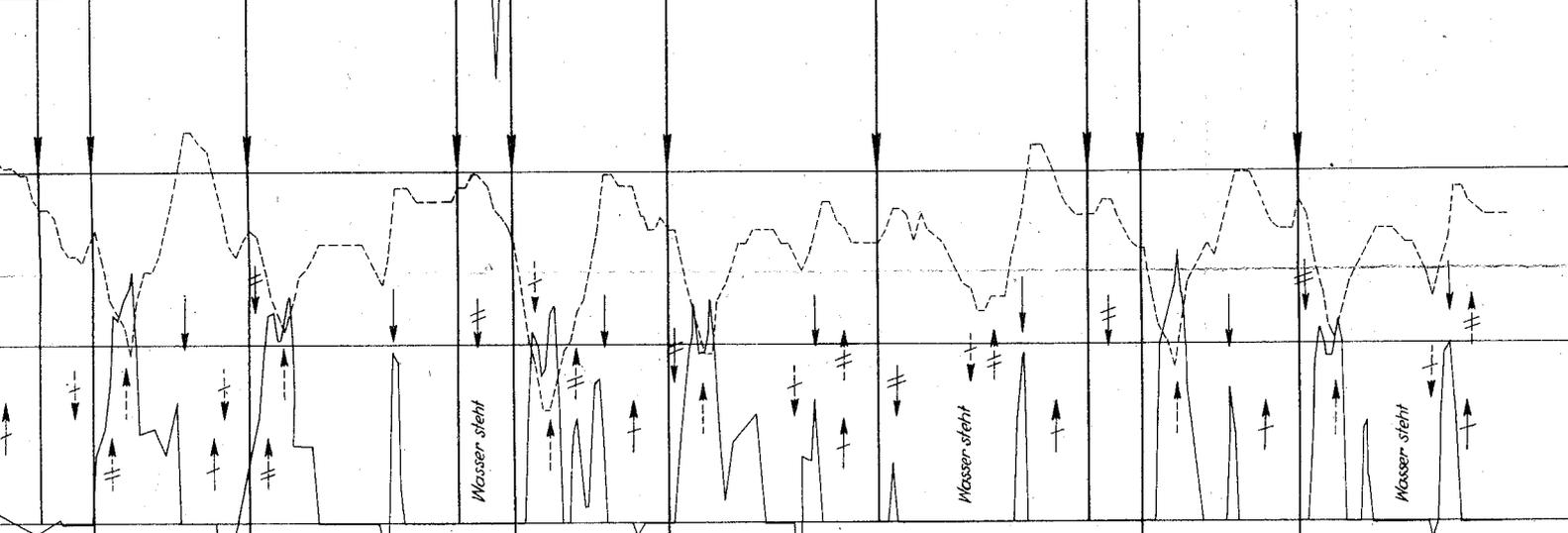
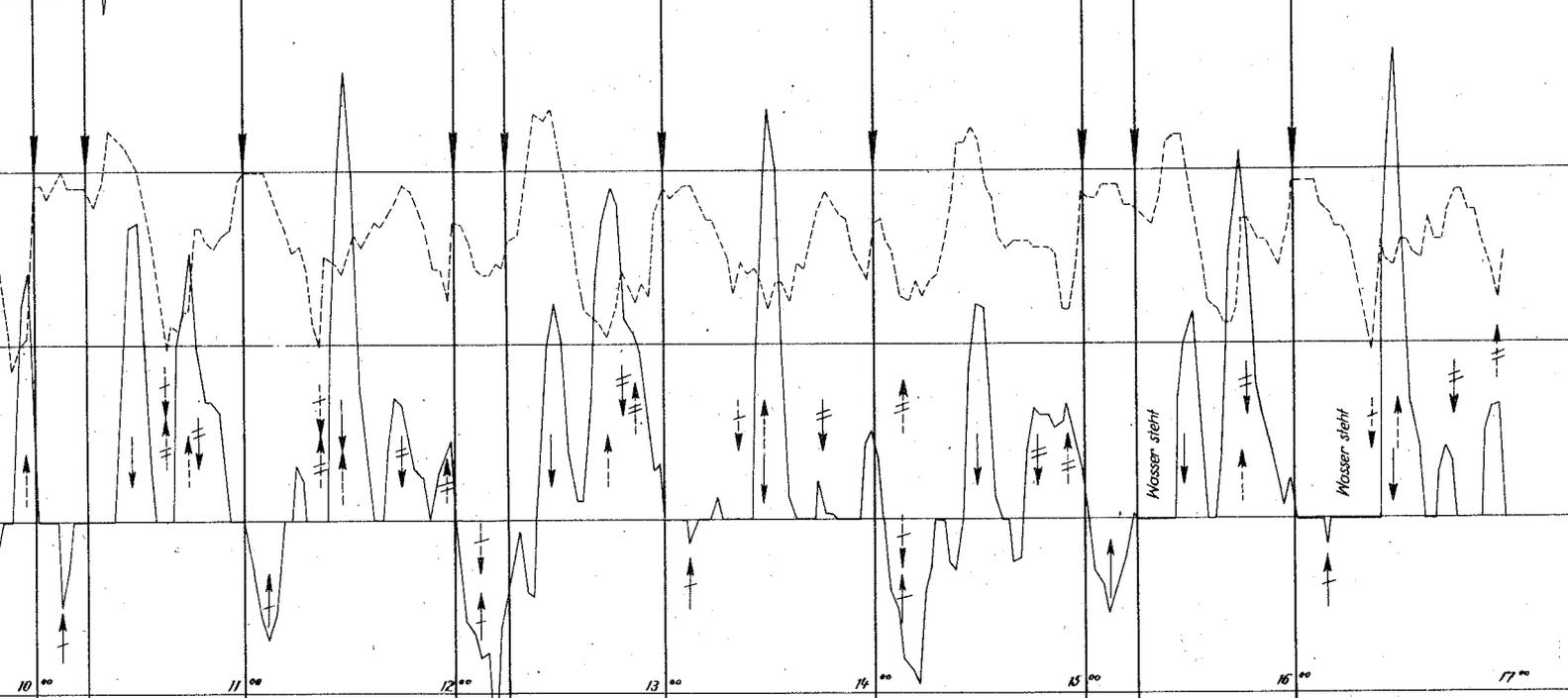
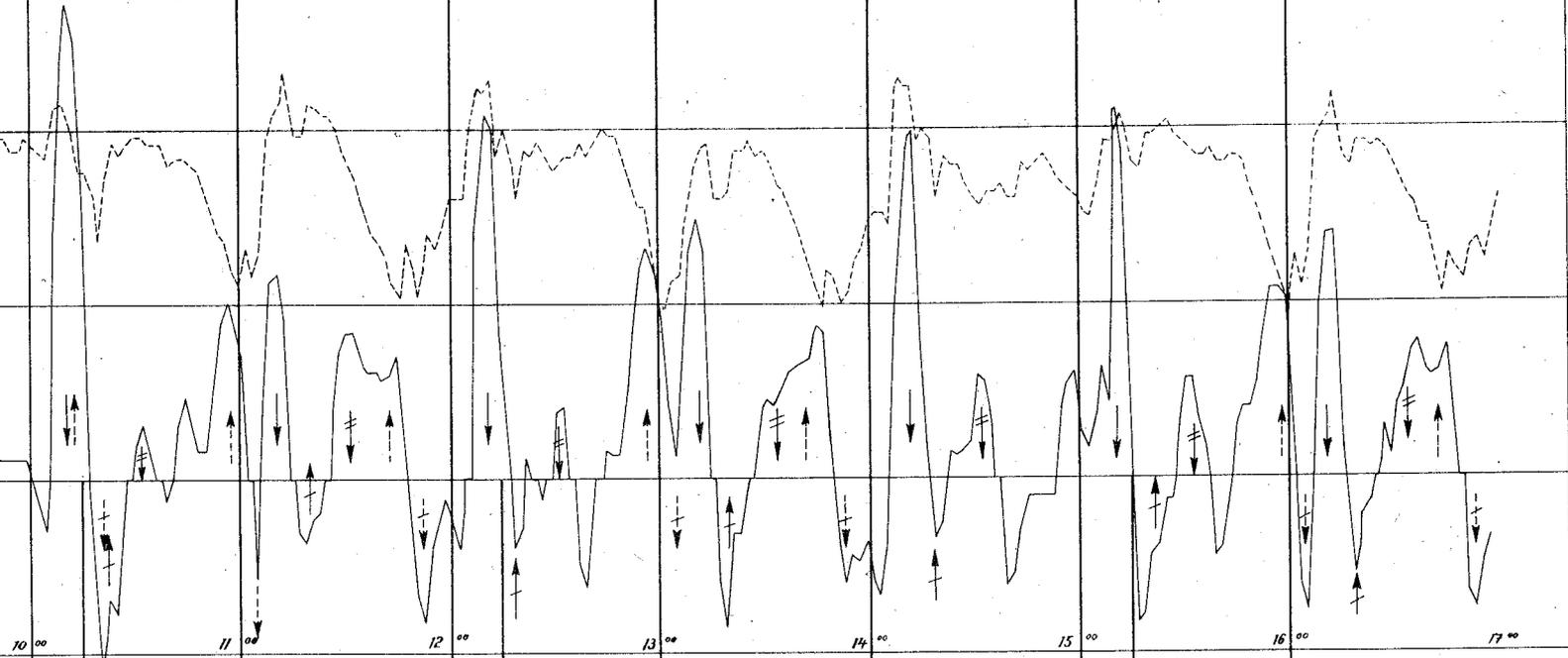
Abb. 2
Schützöffnungen, sekund. Füll- bzw. Entnahmemengen und
Wasserspiegel in den Schleusenammern der Schleusen
Hünxe und Friedrichsfeld

Deutsche Beiträge zu PIANC-Schiffahrtskongressen seit 1949

einfach reflektiert
zweifach reflektiert

Sunk
einfach reflektiert
zweifach reflektiert

10⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 11⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 12⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 13⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 14⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 15⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT 16⁰⁰ SCHLEUSE HÜNKE GELEERT



10⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 11⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 12⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 13⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 15⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 16⁰⁰ SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT

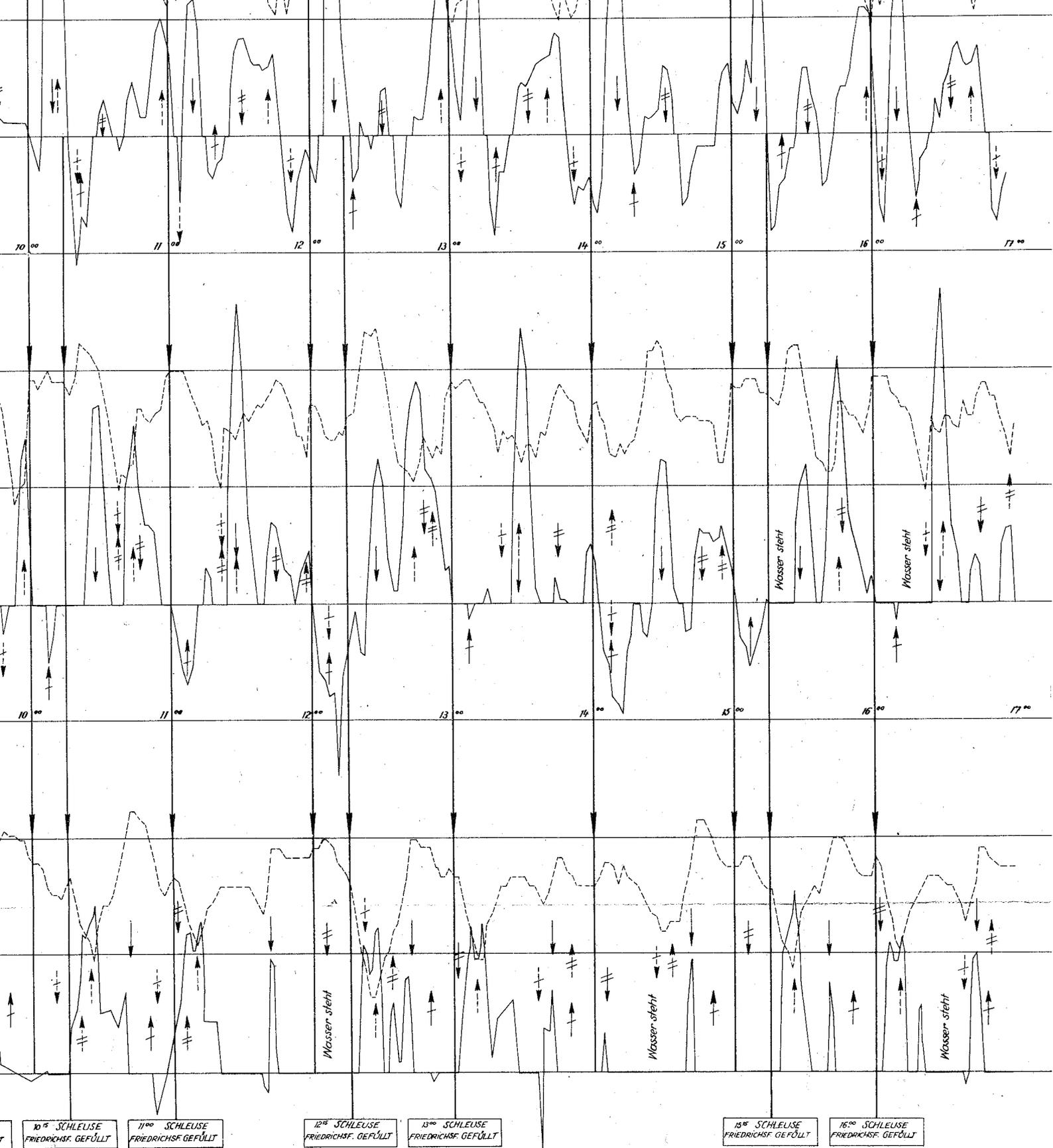


Abb. 3
Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten in der Haltung Friedrichsfeld-Hünxe des Wesel-Datteln-Kanals am 20. 11. 1938

• einfach reflektiert
• zweifach reflektiert

• einfach reflektiert
• zweifach reflektiert

8⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELEERT

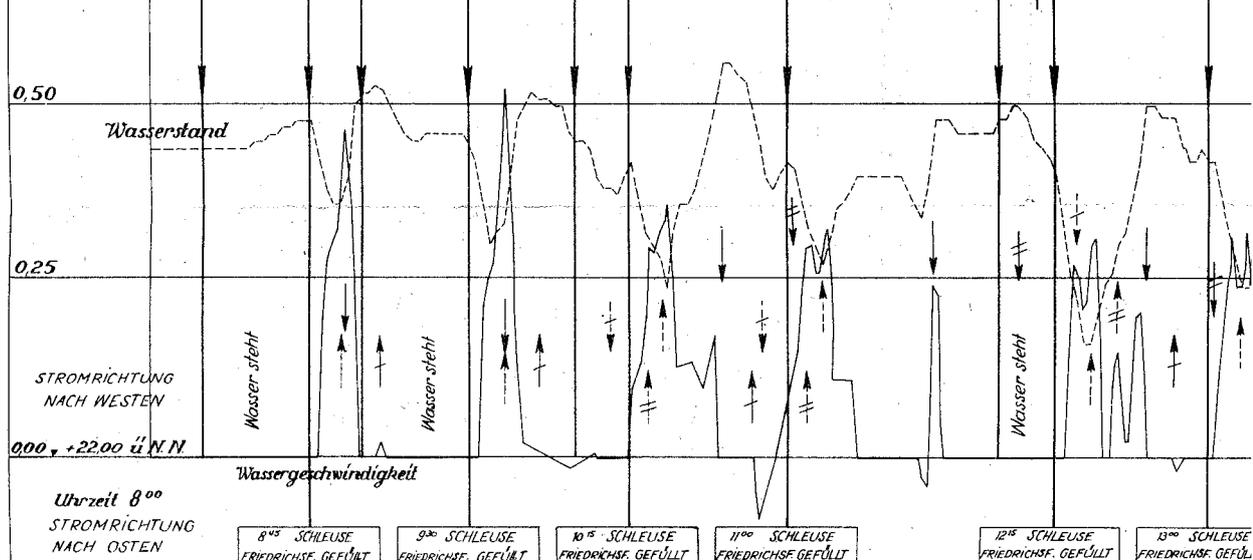
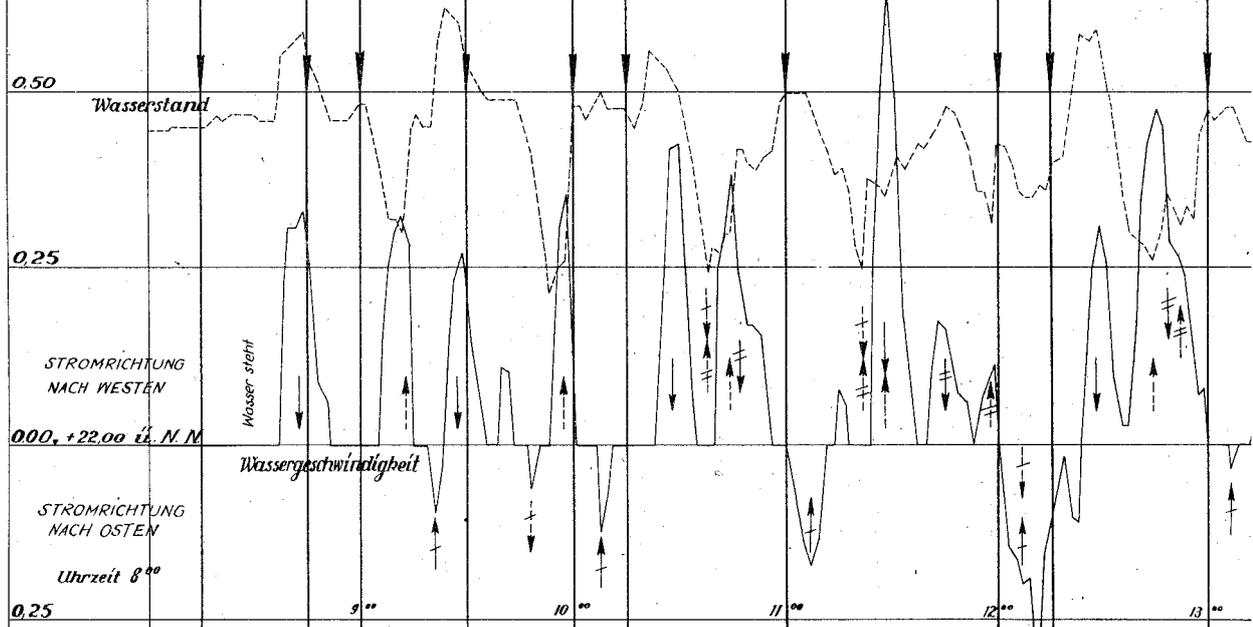
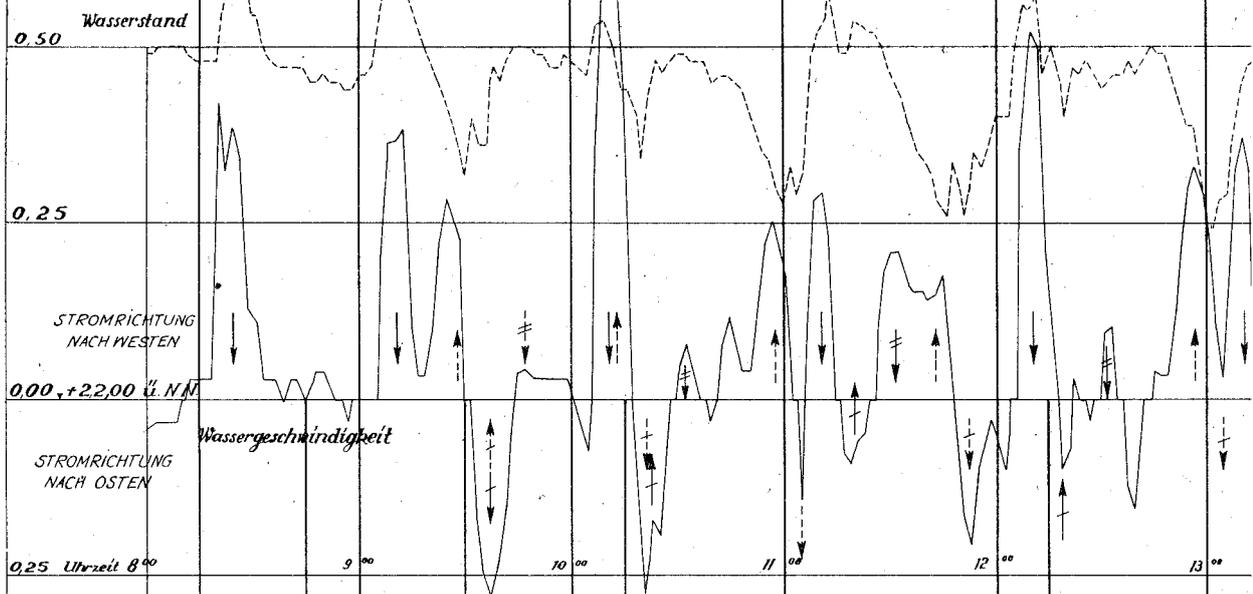
9⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELLERT

10⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELEERT

11⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELEERT

12⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELEERT

13⁰⁰ SCHLEUSE
HÜHNKE GELEERT



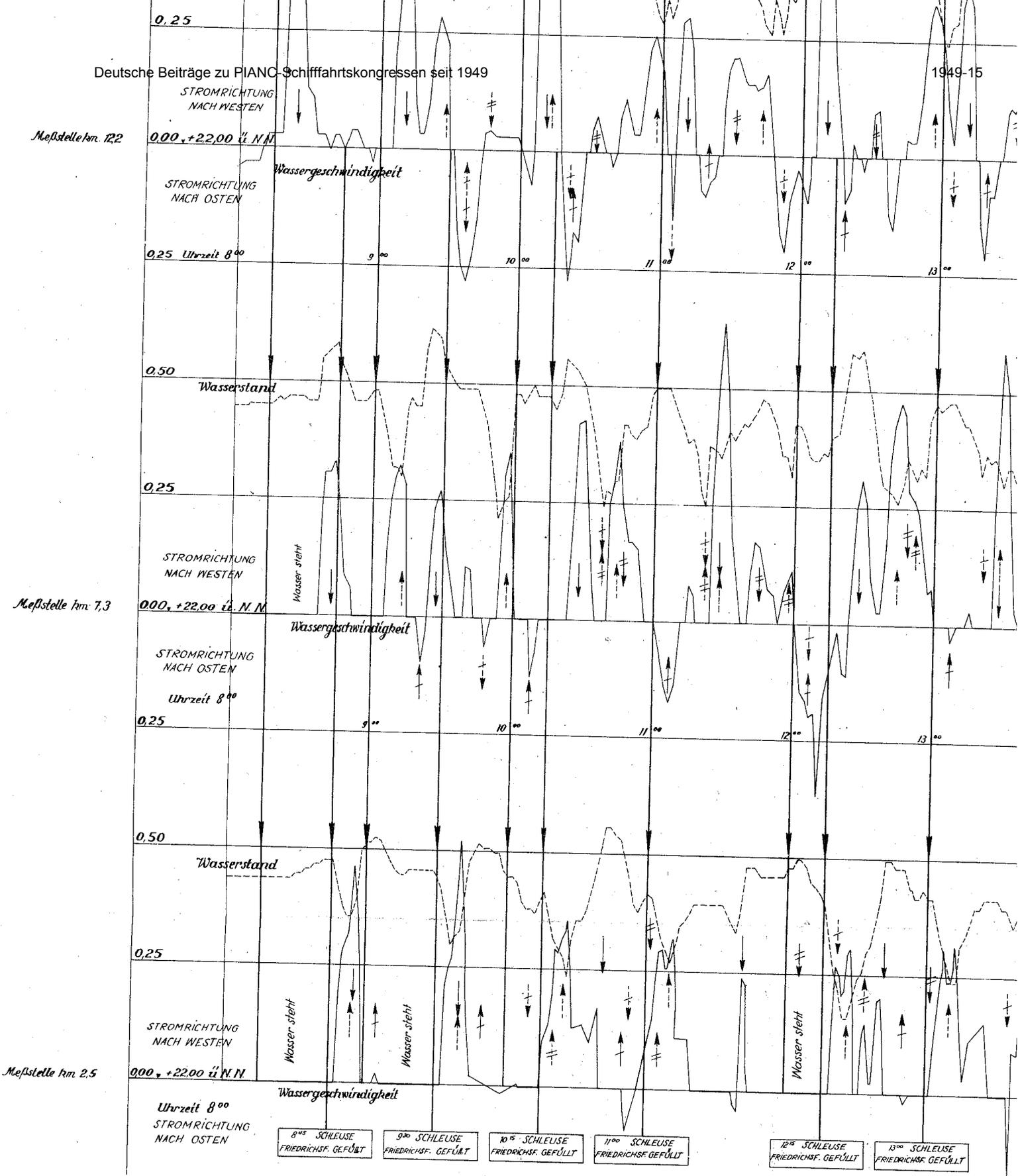


Abb. 3
Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten in der Friedrichsfeld-Hünxe des Wesel-Datteln-Kanals am 20.

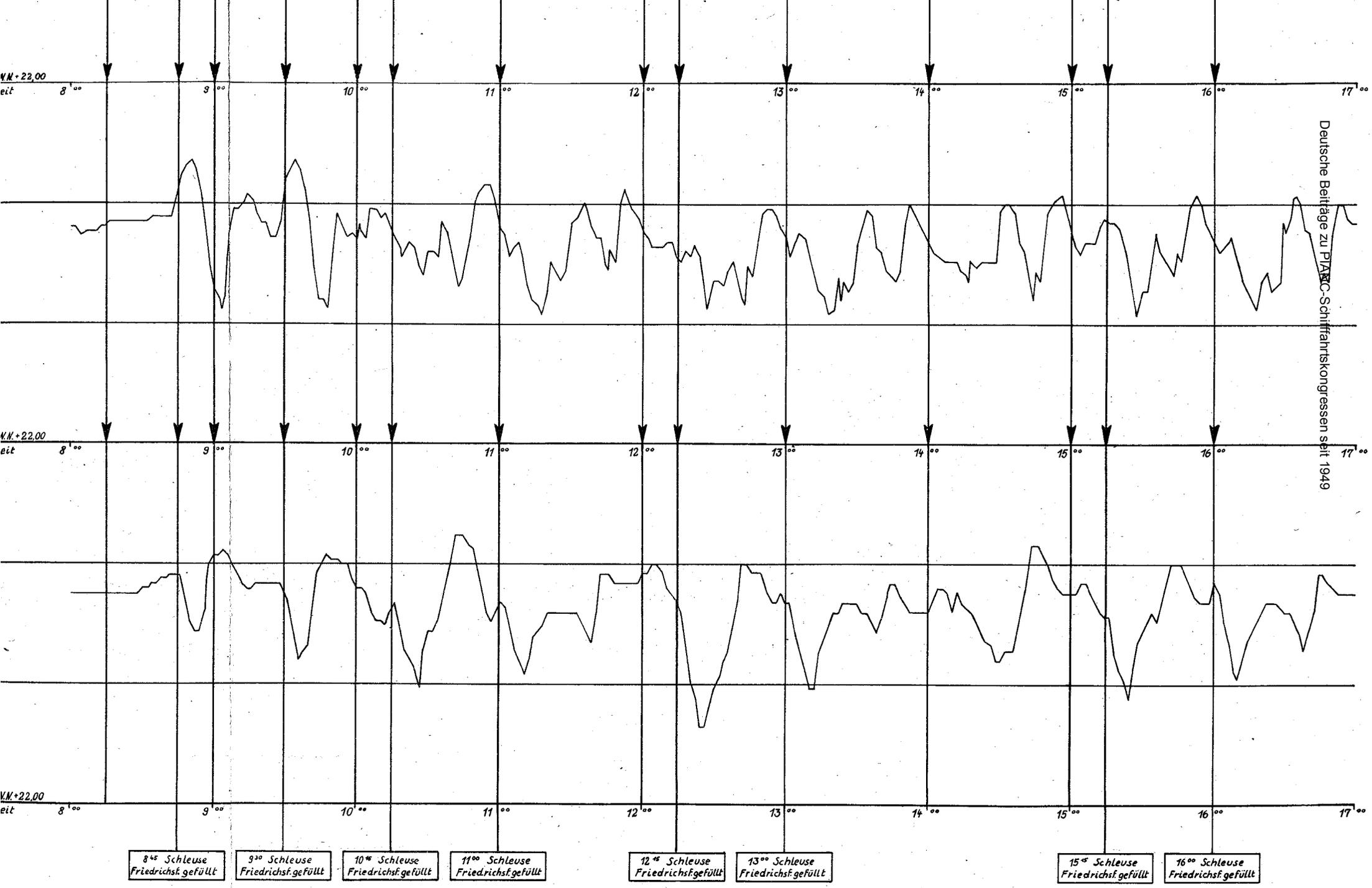
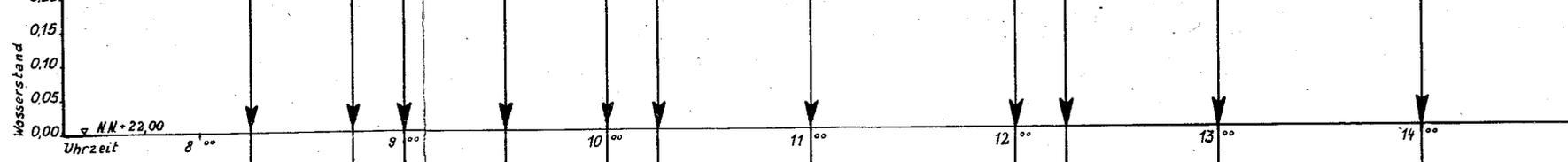
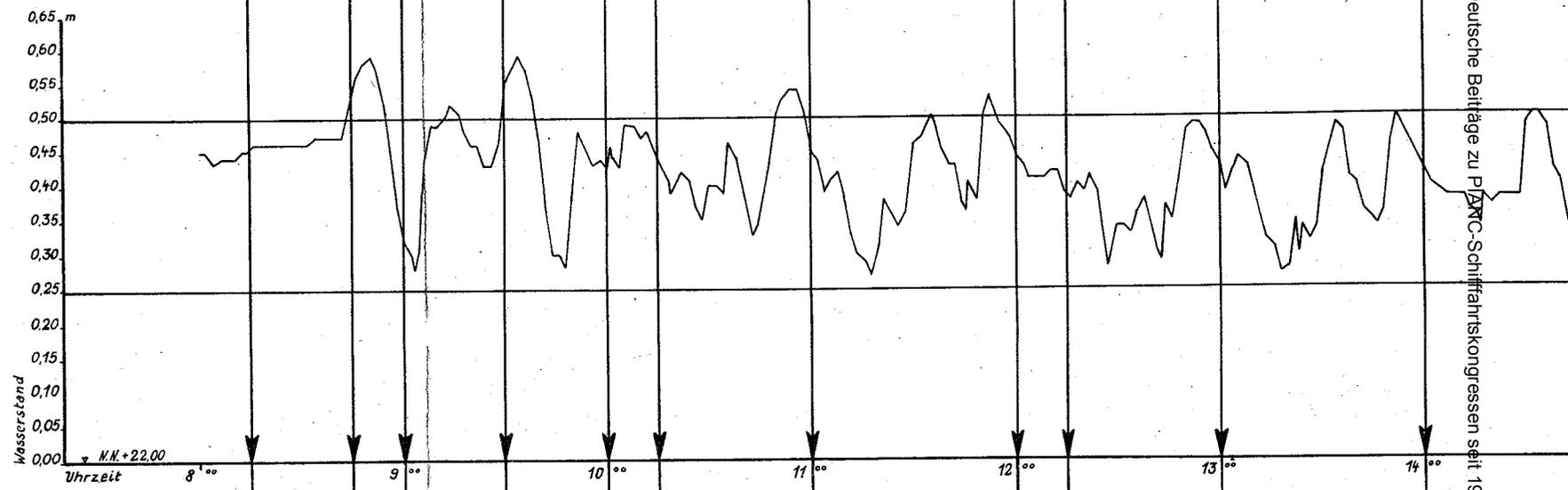


Abb. 4
 Wasserstände in der Haltung Friedrichsfeld-Hünxe am 20. 11. 1938
 (kein Pumpbetrieb)

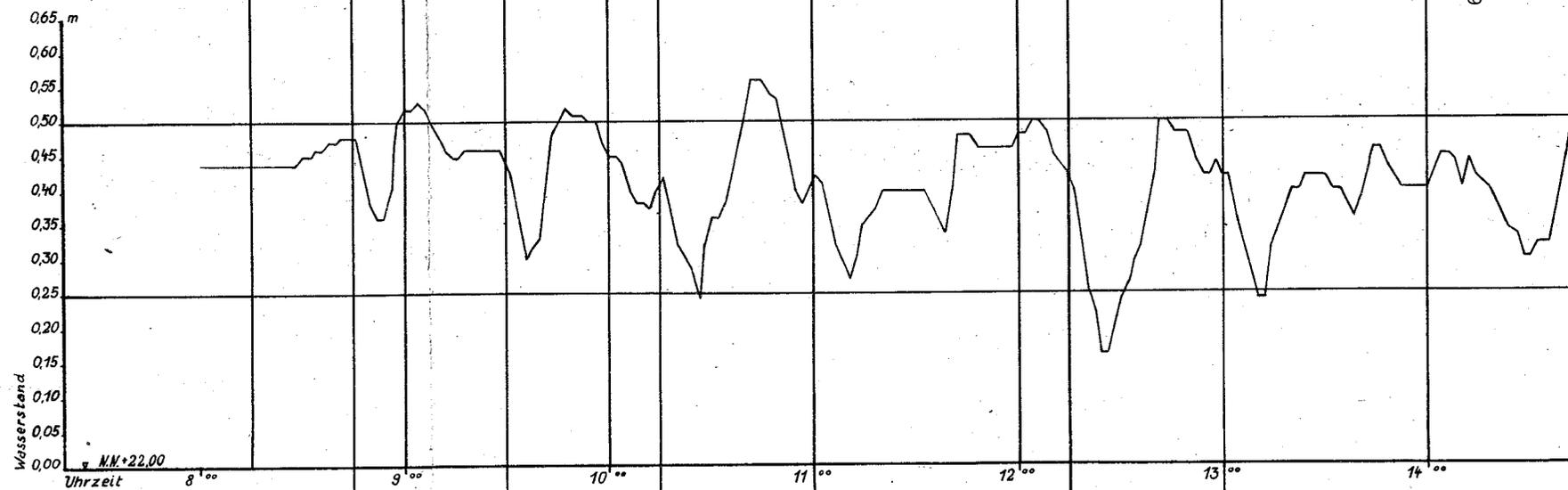
Meßstelle km 7,3



Meßstelle km 4,9



Meßstelle km 25



8⁴⁵ Schleuse Friedrichsf. gefüllt 9³⁰ Schleuse Friedrichsf. gefüllt 10⁴⁵ Schleuse Friedrichsf. gefüllt 11⁰⁰ Schleuse Friedrichsf. gefüllt 12⁴⁵ Schleuse Friedrichsf. gefüllt 13⁰⁰ Schleuse Friedrichsf. gefüllt

Deutsche Beiträge zu PZMC-Schiffahrtskongressen seit 1949

Abb. 4
Wasserstände in der Haltung Friedrichsfeld-Hünxe am 20. 11. 1938
(kein Pumpbetrieb)

8⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

9⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

10⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

11⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

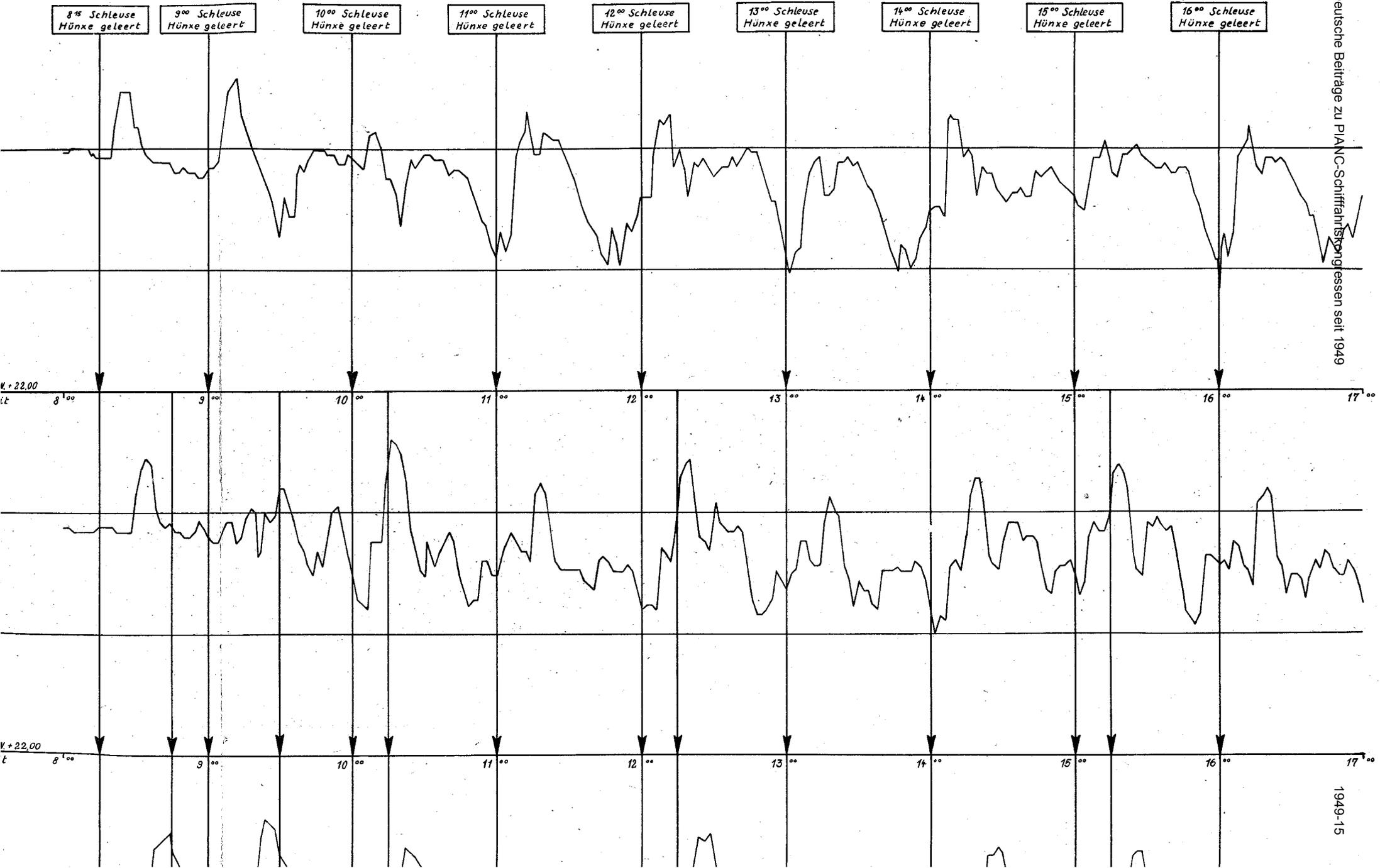
12⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

13⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

14⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

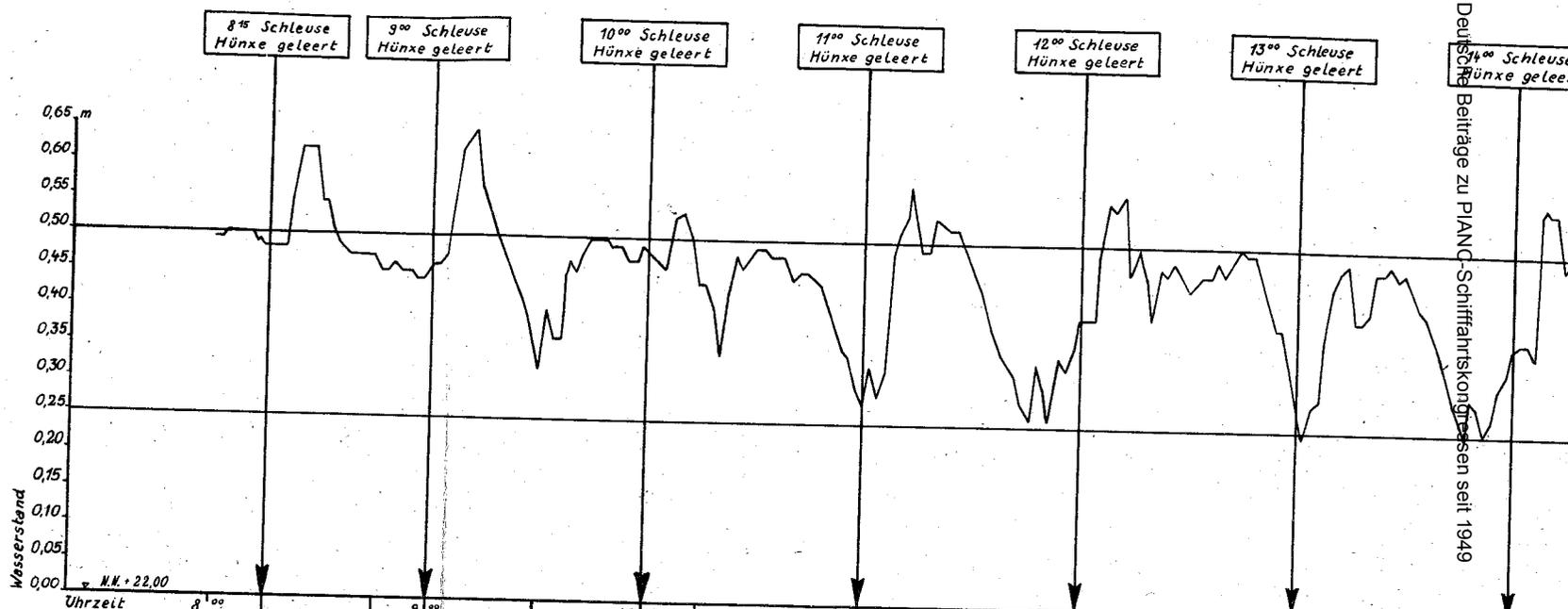
15⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

16⁰⁰ Schleuse
Hünxe geleert

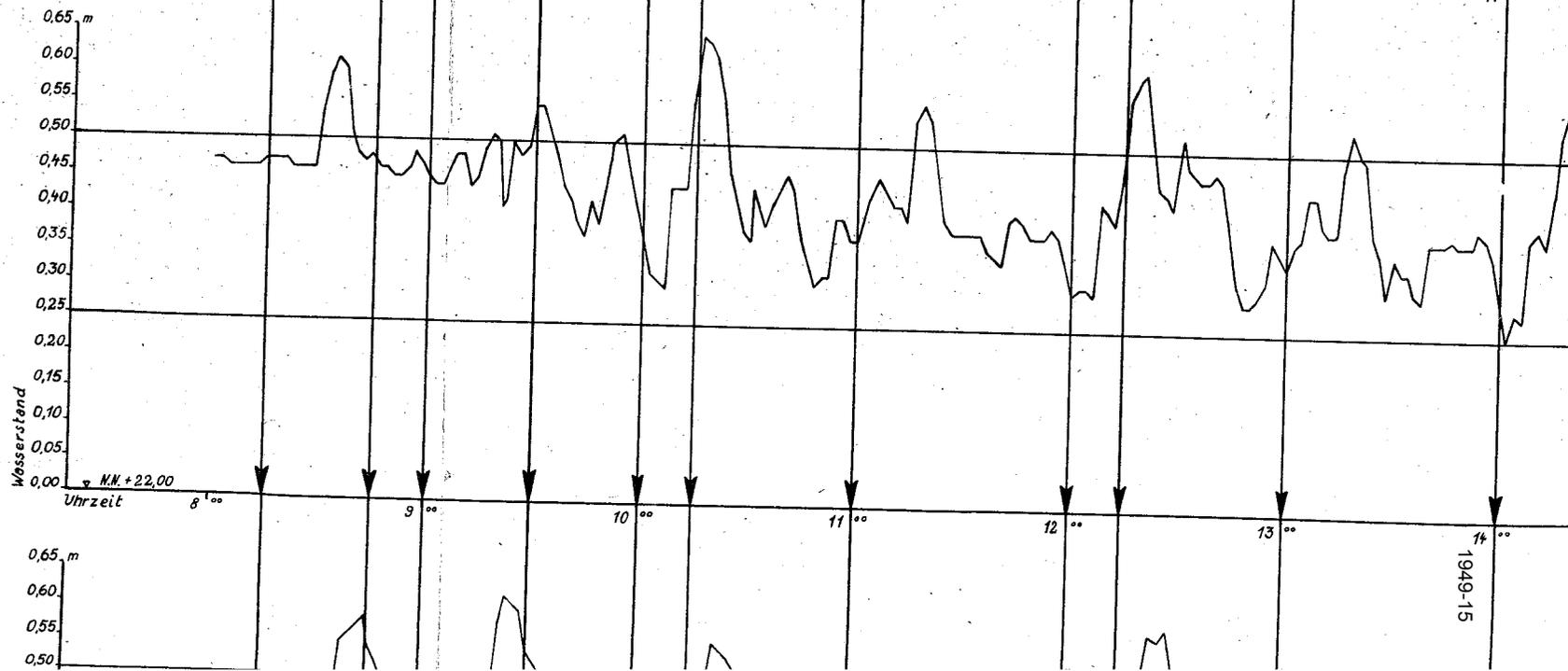


Deutsche Beiträge zu PLANIC-Schiffahrtstransportessen seit 1949

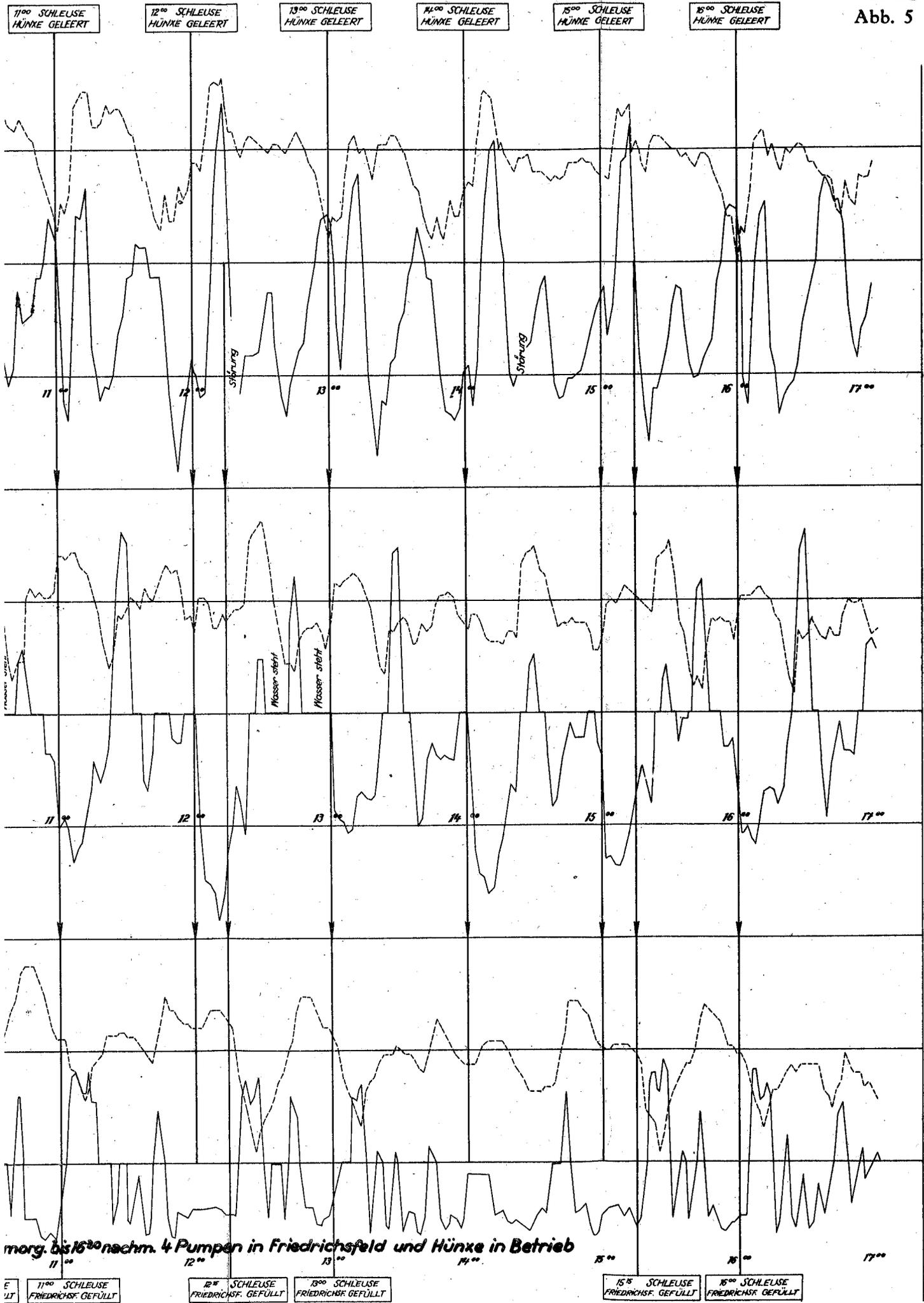
Meßstelle km 12,2



Meßstelle km 9,7



Nr. 15
Abb. 5



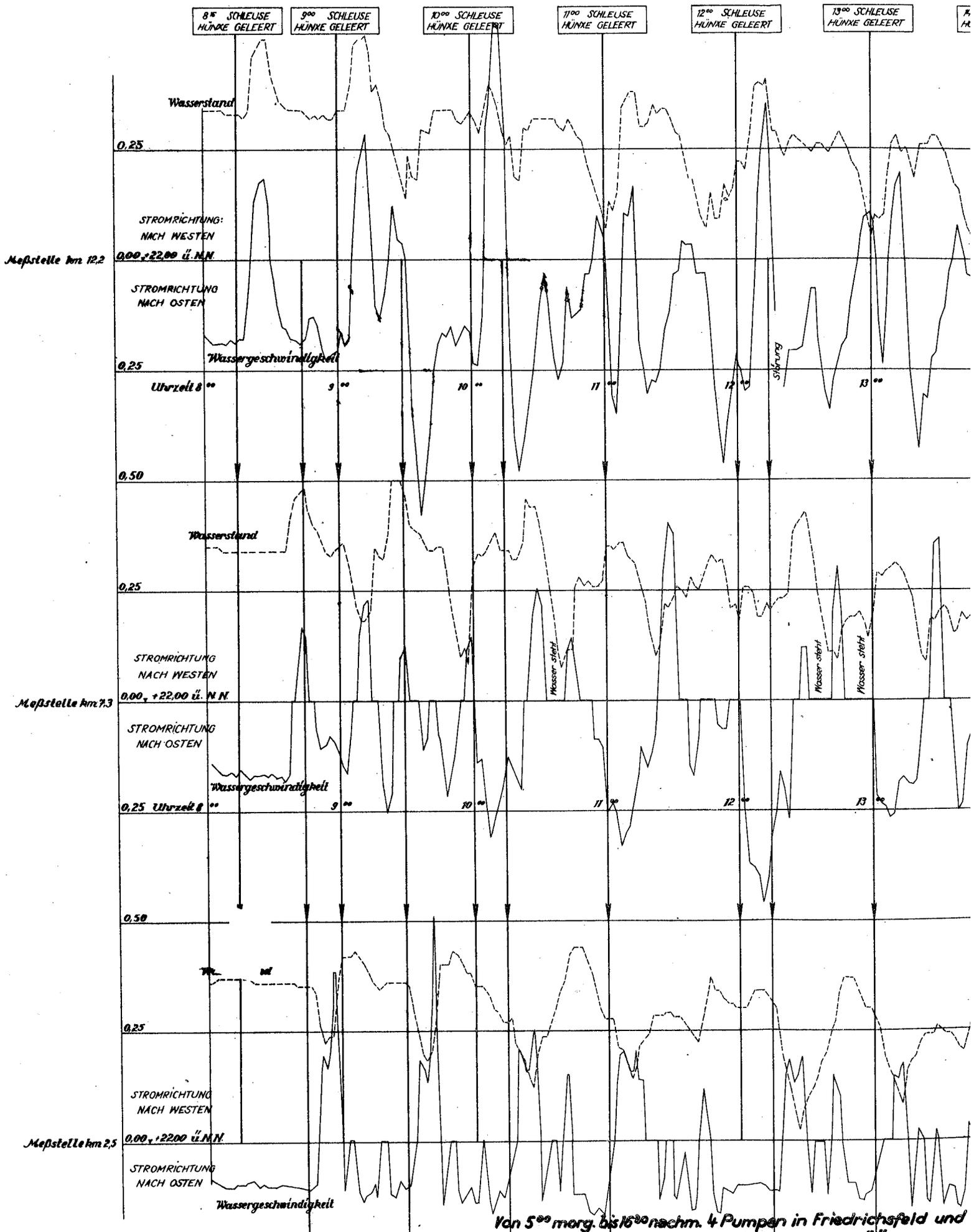
morg. bis 16:30 nachm. 4 Pumpen in Friedrichsfeld und Hünke in Betrieb

E 11:00 SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 12:00 SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 13:00 SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 15:15 SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT 16:00 SCHLEUSE FRIEDRICHSF. GEFÜLLT



Abb. 5

Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten in der Haltung Friedrichsfeld-Hünxe des Wesel-Datteln-Kanals am 13. 11. 1938



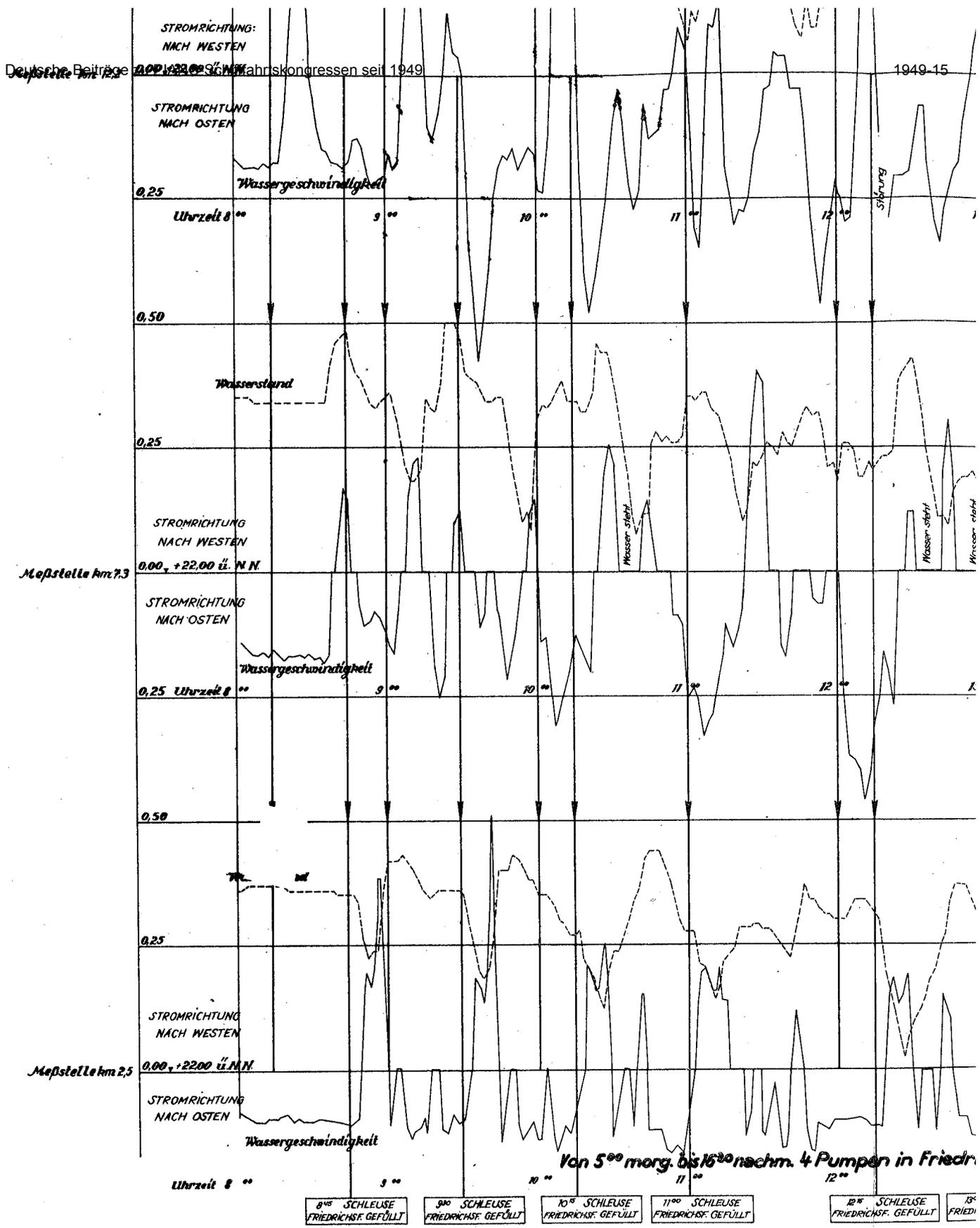
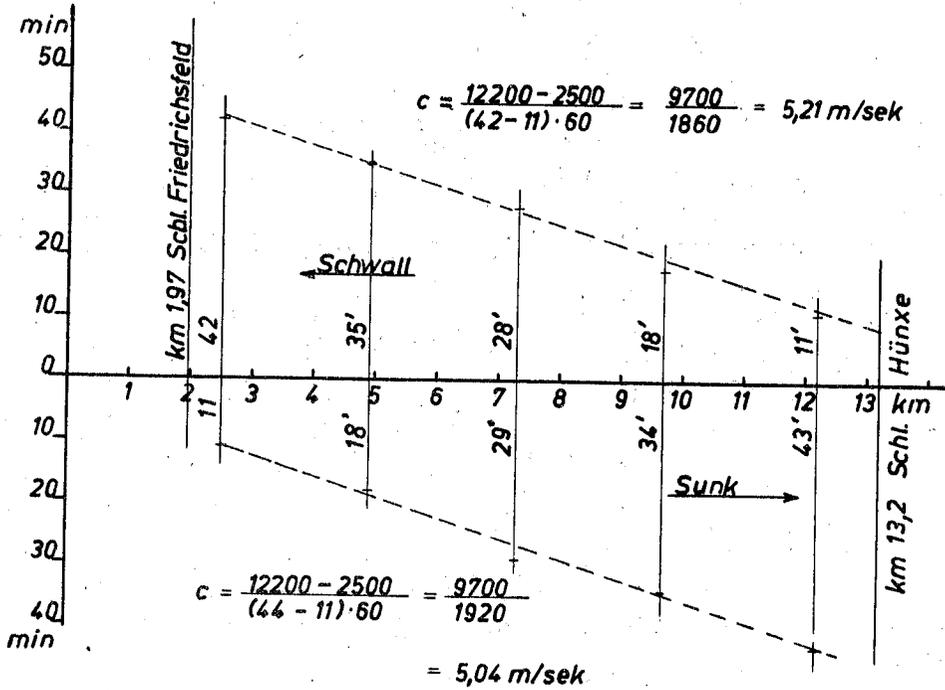


Abb. 5
Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeit
Friedrichsfeld-Hünxe des Wesel-Datteln-Kanal

a) am 20. XI. 38, kein Pumpbetrieb



b) am 13. XI. 1938, 4 Pumpen im Betrieb

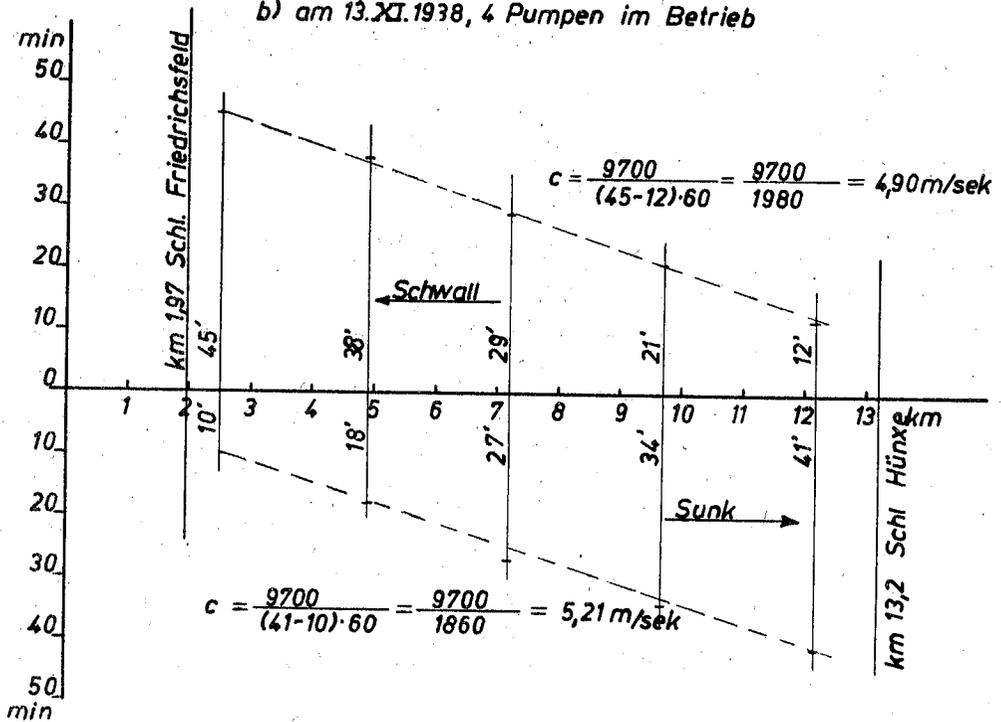


Abb. 6
Gemittelte Laufgeschwindigkeiten der Scheitel aller Schwall- und Sunkwellen

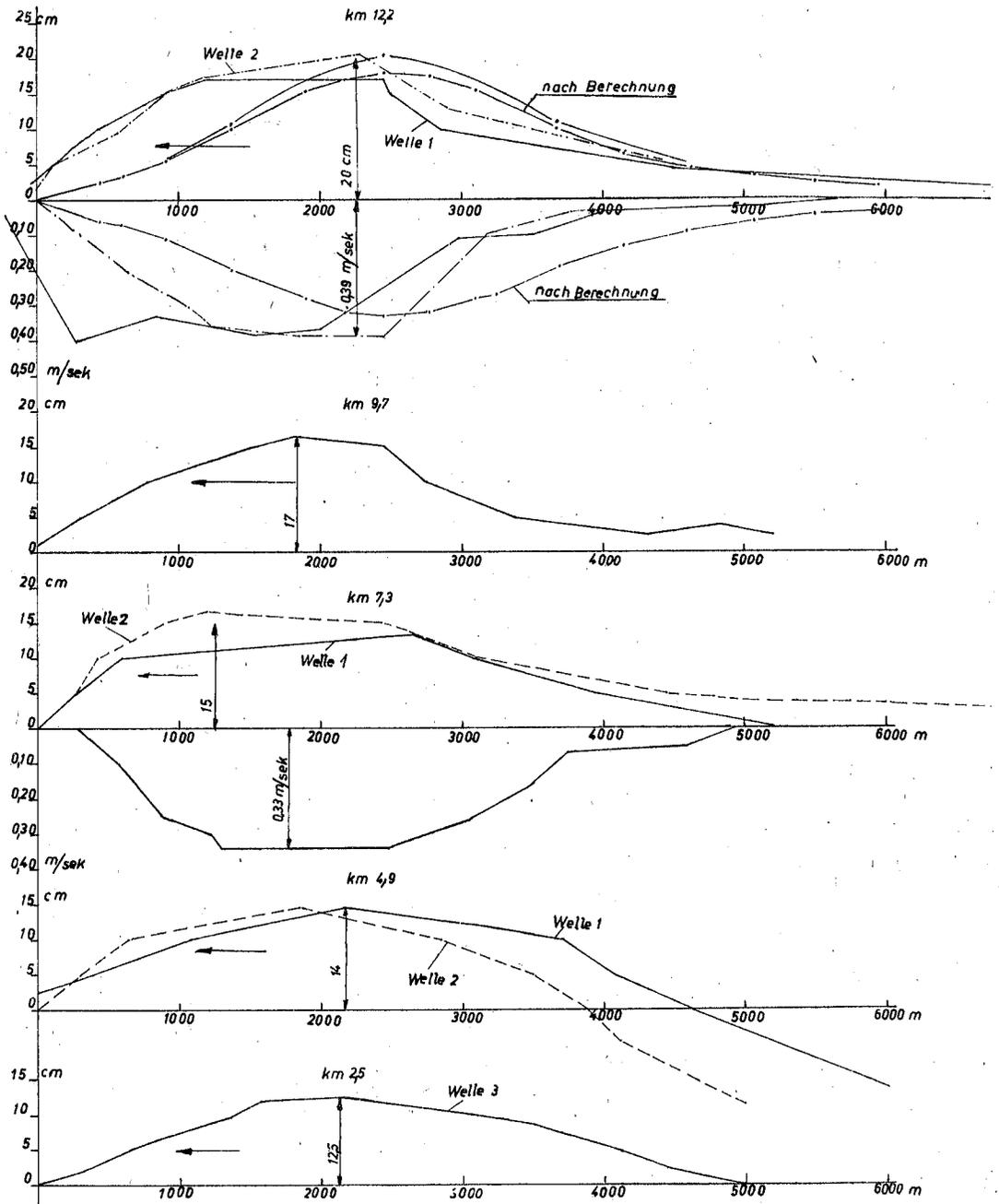
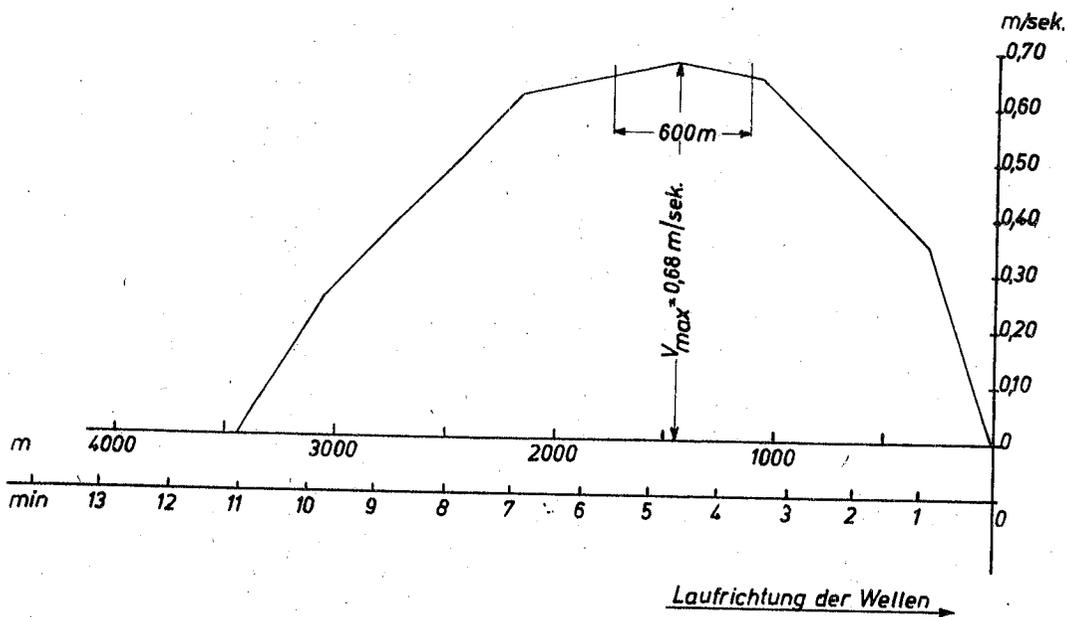


Abb. 7
Darstellung einzelner Schwallwellen

a) Richtung nach Westen
am 20. XI. 38



b) Richtung nach Osten
am 13. XI. 38

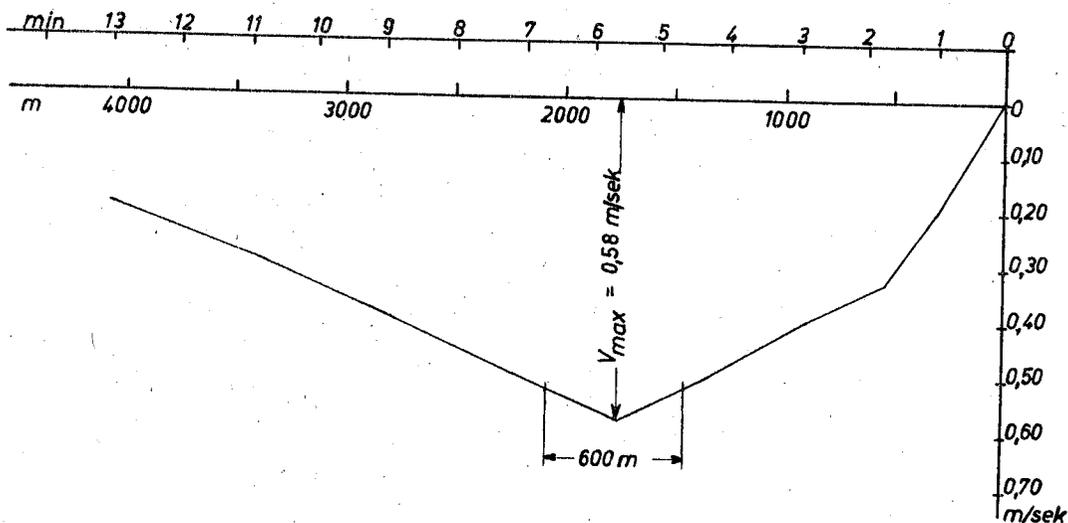


Abb. 8
Größe gemessene Strömungsgeschwindigkeiten

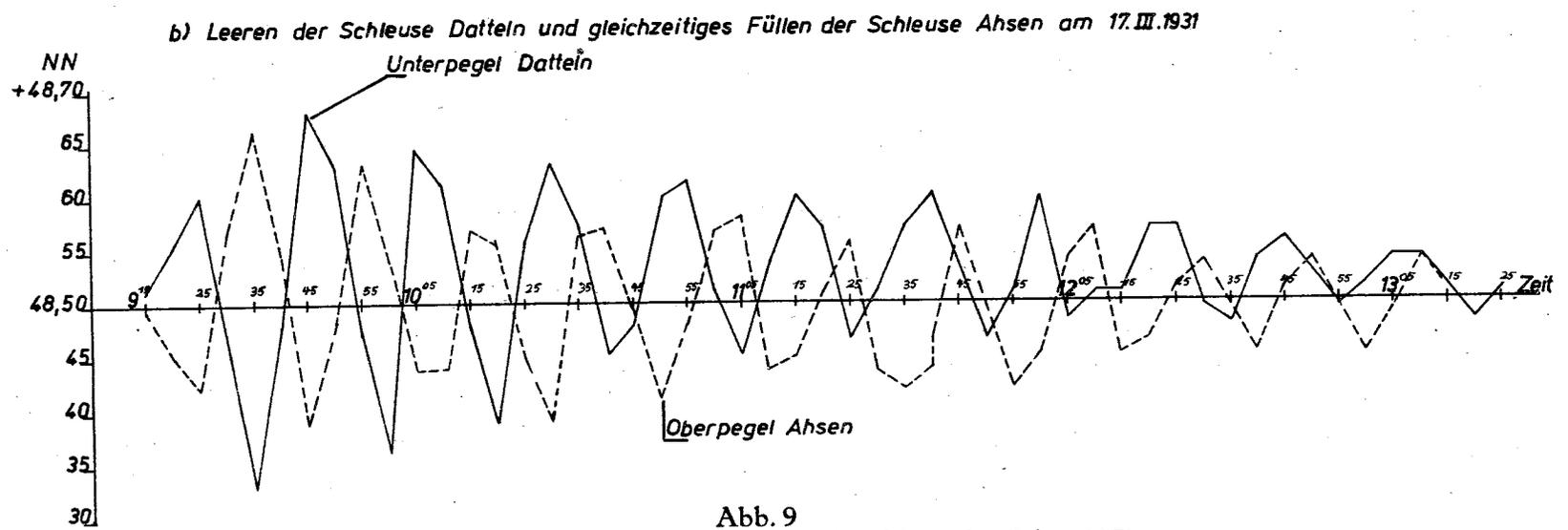
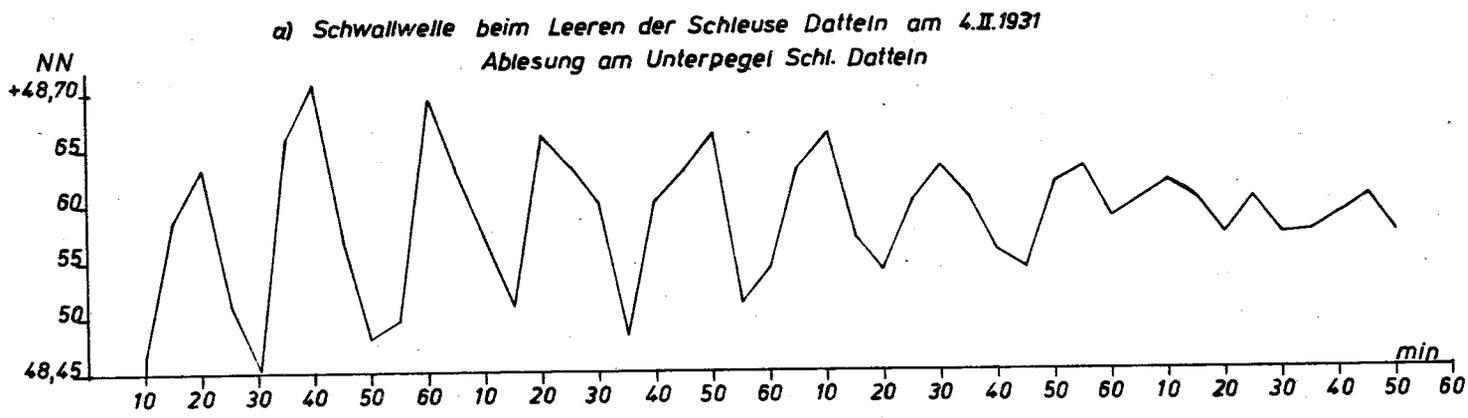


Abb. 9
Versuche auf der Kanalstrecke Datteln-Ahsen im Jahre 1931

Abb. 10^a

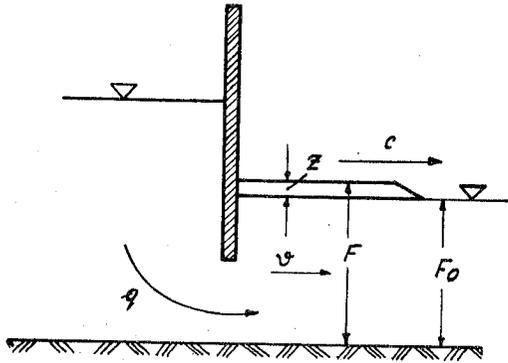
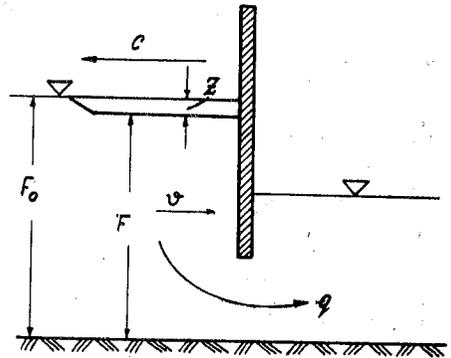


Abb. 10^b



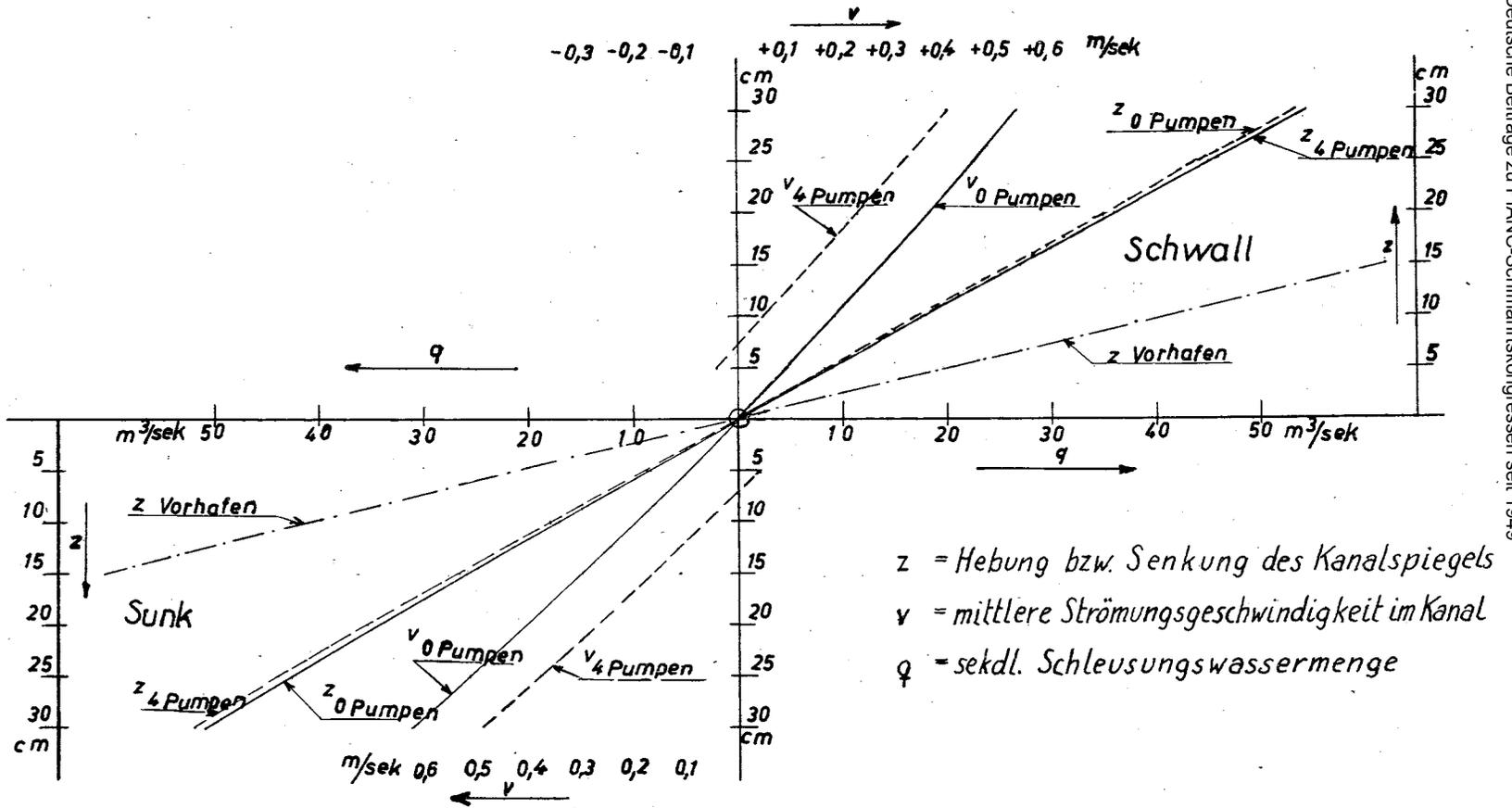


Abb. 11
Diagramm

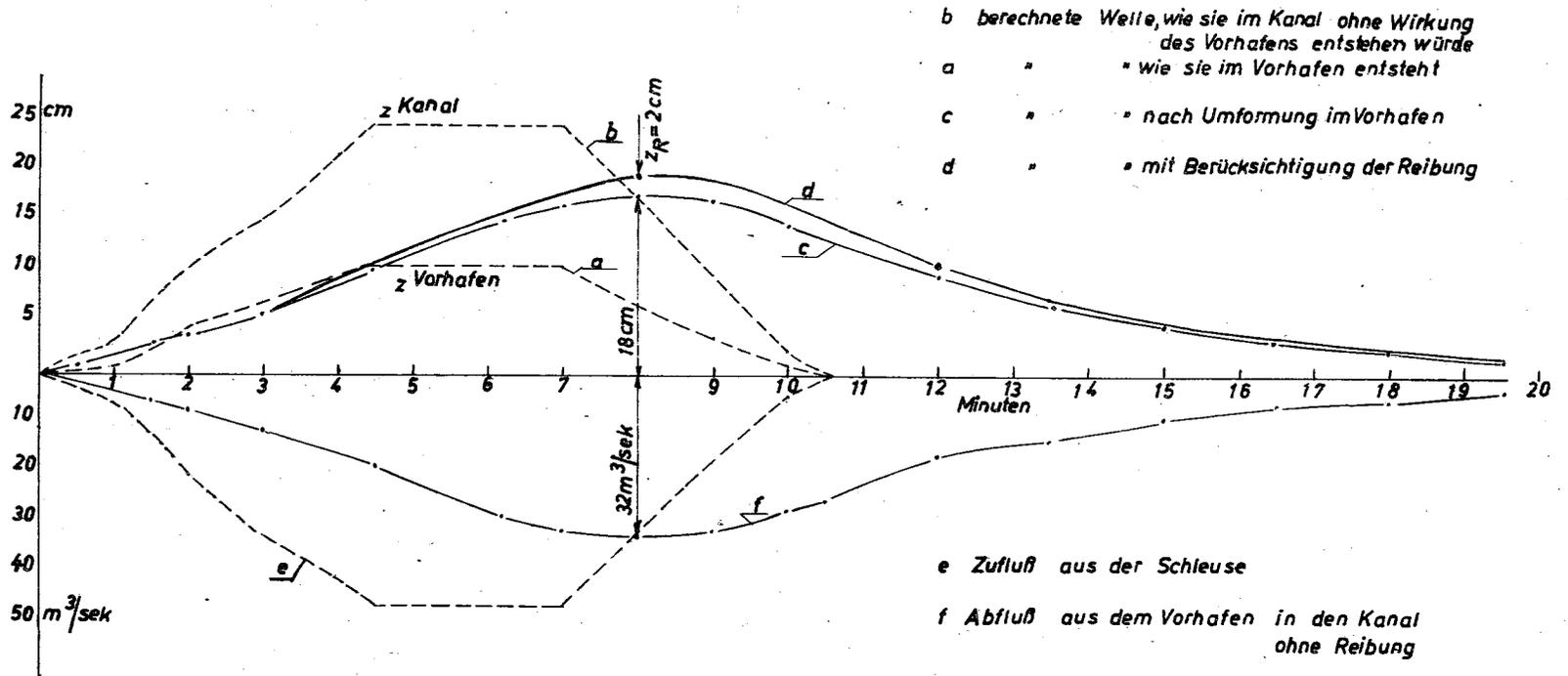


Abb. 12
Darstellung einer berechneten Schwallwelle

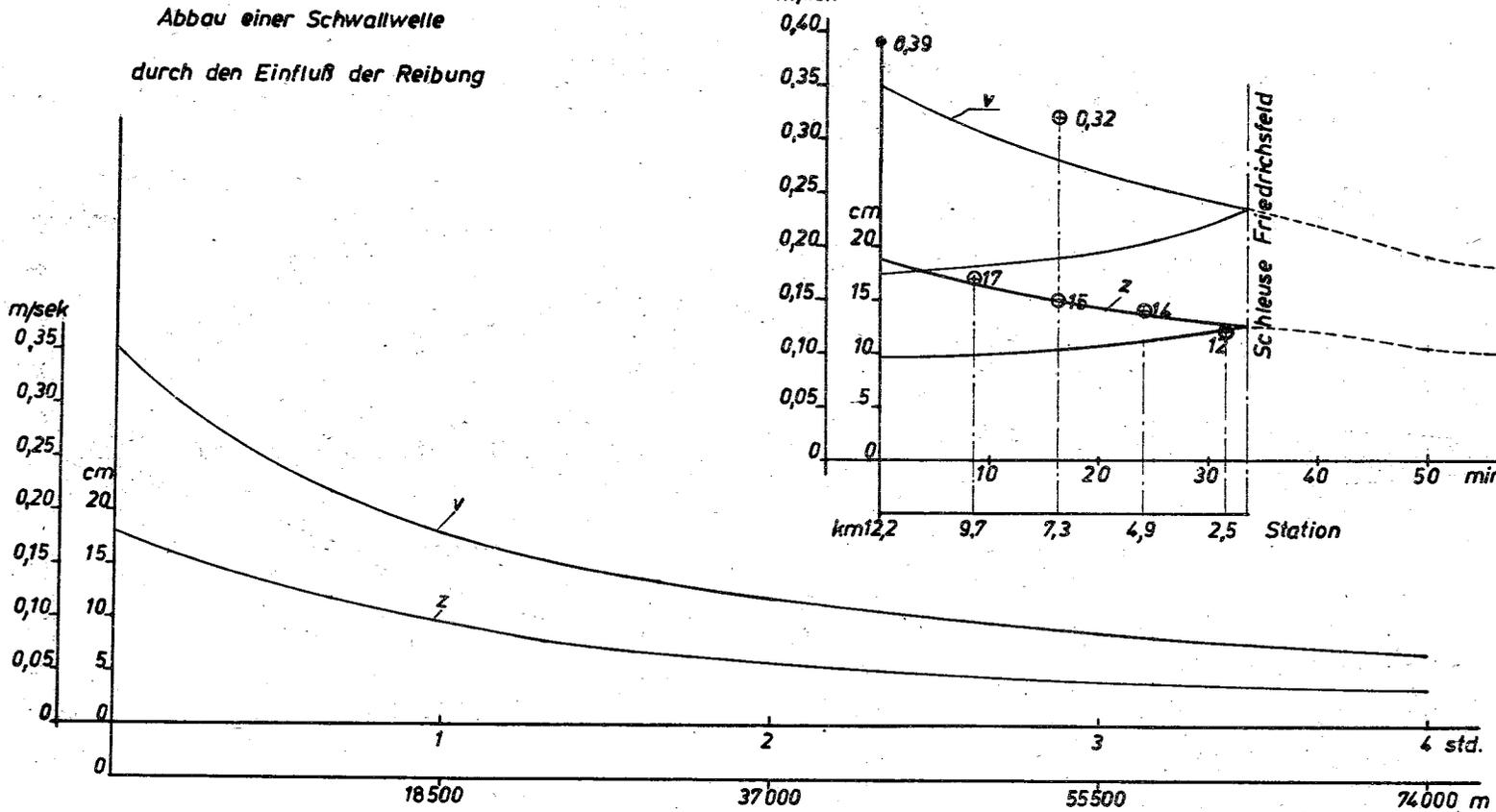


Abb. 13
Abbau einer Schwallwelle durch den Einfluß der Reibung