

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Wittmann, Heinrich

Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefe

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104708>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wittmann, Heinrich (1953): Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefe. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 18. Internationaler Schifffahrtkongreß; Rom, Italien, 1953. Bonn: PIANC Deutschland. S. 15-22.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Abt. I Frage 1b

1. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

Von Prof. Dr.-Ing. H. Wittmann, Karlsruhe.

Zusammenfassung: An einer Staustufe können beim plötzlichen Ausfall der Maschinen des Kraftwerks Absperrschwall- und -sunke entstehen, die sich in die neben dem Kraftwerk liegenden Vorhäfen und geöffneten Schleusenkammern fortpflanzen und den Schiffahrtbetrieb stören. Durch Schnellsenken der Wehrverschlüsse läßt sich das Ausmaß des Schwall- im Oberwasser und des Sunkes im Unterwasser vermindern.

Es war nicht möglich, die Vorgänge in dem gekrümmten und erweiterten Grundriß des Flusses genügend genau zu berechnen. Sie konnten jedoch an einem wasserbaulichen Modell im Maßstab 1:60 einwandfrei verfolgt werden mit dem Ergebnis, daß die Schwallhöhen im oberen Vorhafen und in der Schleusenkammer durch das Schnellsenken auf ein für die Schiffahrt unbedenkliches Maß reduziert werden. Das gleiche gilt für die Sunkwelle im Unterwasser. Es ist hierbei für alle Abflusssmengen ein genügendes Absenkmaß an den Wehrverschlüssen erforderlich, das durch die Konstruktion der Verschlüsse und ihren Betrieb erreicht werden kann.

An einer Staustufe mit dem Grundriß der Abb. 1 können durch den plötzlichen Ausfall einer bis sämtlicher vier Maschinen des Kraftwerks Absperrschwall- und -sunke entstehen, die sich in die Vorhäfen und geöffneten Schleusenkammern fortpflanzen und dadurch den Schiffahrtbetrieb stören. Folgende Merkmale der Wasserkraftanlage sind kennzeichnend:

Wehr: 5 Öffnungen von je 27,0 m Weite. Doppelhakenschütze von 11,25 m Konstruktionshöhe. Das Oberschütz kann um 4,00 m gesenkt werden.

Kraftwerk: 4 Turbinen mit einer Vollwassermenge $Q_V = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Schleuse: 180 m lang, 12 m breit.

Abflusssmengen: $NQ = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Q beim höchsten Schiffahrtswasserstand $= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$, $HHQ = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Berechnung der Schwall- und Sunkerscheinungen stieß bei dem unregelmäßigen Grundriß der Abb. 1, der Verformungen der Schwallwelle hervorruft, auf Schwierigkeiten. Es wurden daher wasserbauliche Modellversuche im Maßstab 1:60 ausgeführt. Die Übertragung der gemessenen Modellwerte in die Natur erfolgt durch das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz, da die Hebungen und Senkungen des Wasserspiegels bei den Schwall- und Sunkwellen nur durch Trägheits- und Schwerekräfte hervorgerufen werden. Eine Berechnung mit den gebräuchlichen, aus Natur- und Modellmessungen entwickelten Formen für den einfachen Querschnitt K bei einem kennzeichnenden Betriebsfall ergab sehr gute Übereinstimmung der gemessenen mit der berechneten Schwallhöhe.

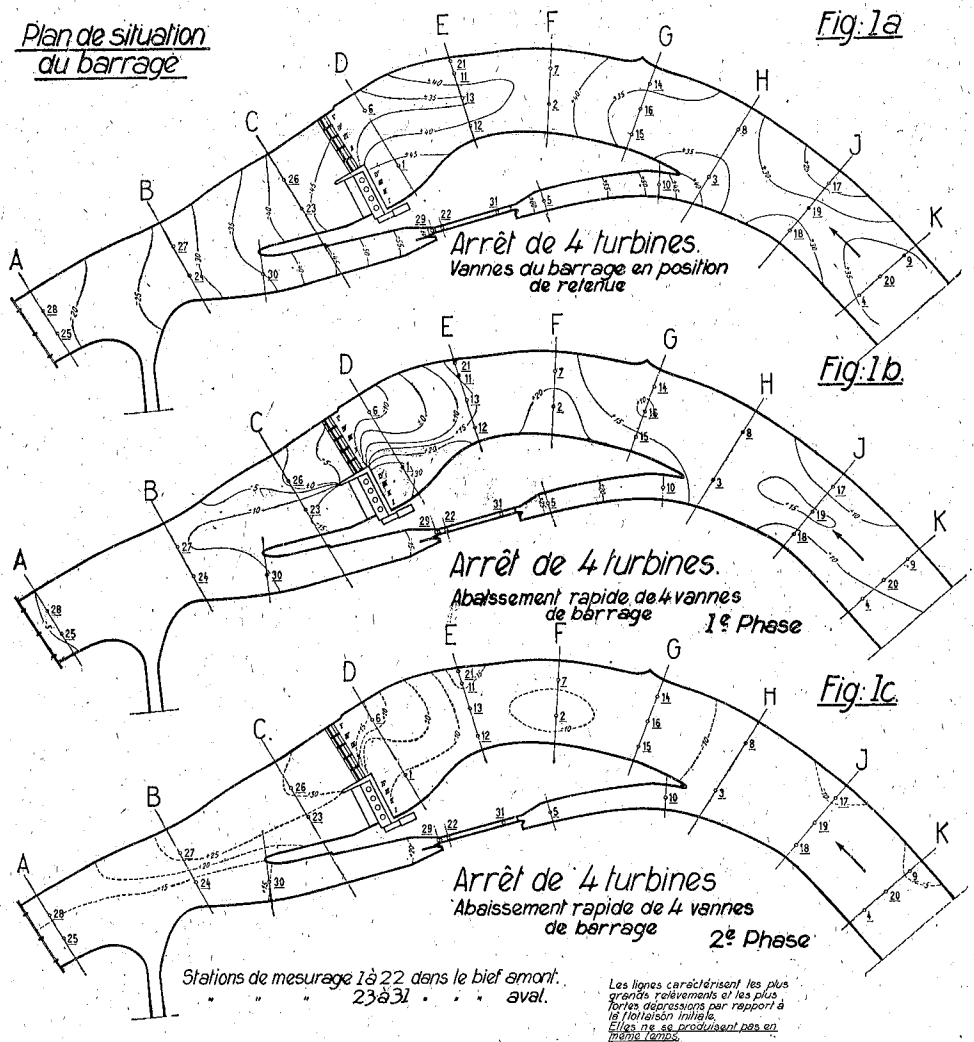
Für die Feststellung der raschen Wasserstandsänderungen im Modell war ein trägheitsfreies Meßgerät entwickelt. Es übertrug durch elektrische Widerstandsmessung die Bewegungen des Wasserspiegels auf Spiegelgalvanometer mit empfindlichem Ausschlag und registrierte den Verlauf der Schwall- und Sunkwellen durch ein besonderes Schreibgerät.

Die allgemeinen Schwall- und Sunkvorgänge.

Die Schwallwelle im Oberwasser breitet sich vom Kraftwerk nach allen Richtungen der freien Wasserfläche, seitlich nach dem Wehr und stromaufwärts aus. Dabei nimmt sie im gleichen Maß an Höhe ab wie ihre Frontbreite zunimmt.

Während des Durchlaufens der Stromkrümmung wird die Wellenfront beim Auftreffen auf die Ufer reflektiert. Hieraus und durch die Unterschiede der Laufgeschwindigkeiten in den einzelnen Punkten der Wellenfront ergibt sich ein dauernder Wechsel von Form, Höhe und Richtung der Schwallwelle. Bei der Ein-

Hauteurs des vagues de relèvement et de dépression
 $Q = 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$.



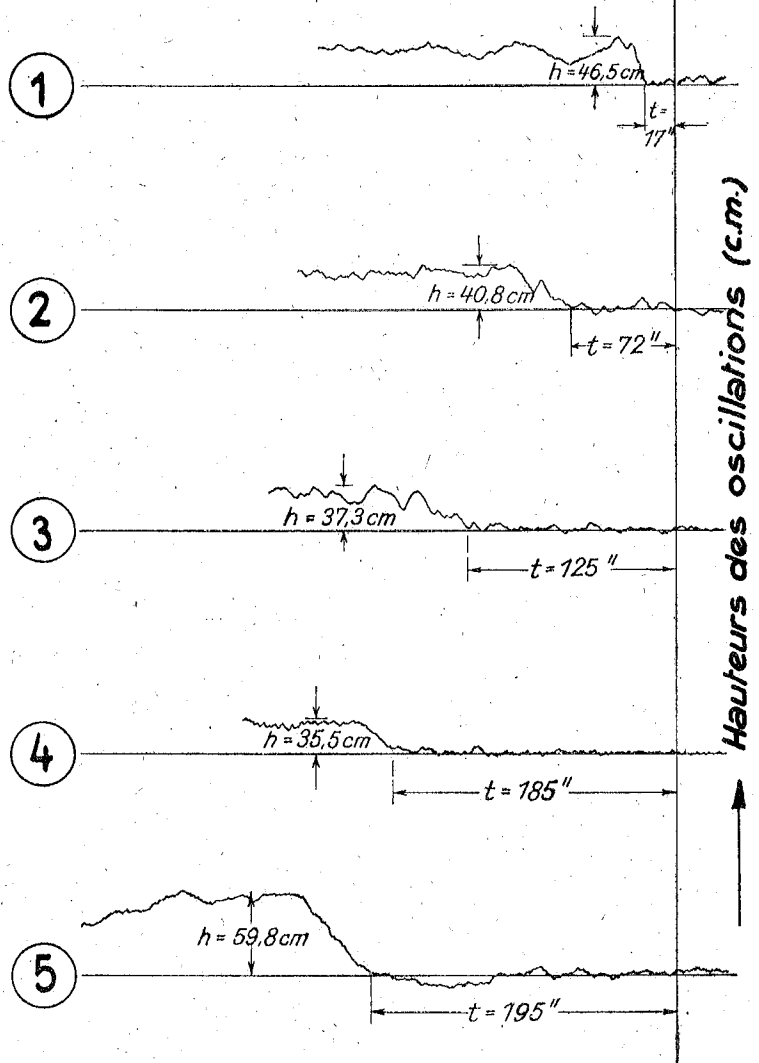
Hauteurs des vagues de relèvement et de dépression
 Arrêt de 4 Turbines
 Vannes du barrage en position de retenue
 Abaissement rapide de 4 vannes de barrage

Höhen der Schwall- und Sunkwellen
 Ausfall von 4 Turbinen.
 Wehrverschlüsse in Staustellung
 Schnellsenken von 4 Wehrverschlüssen

Abb. 1. Höhen der Schwall- und Sunkwellen.

$Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$
 Arrêt de 4 Turbines
 Vannes du barrage en position de retenue
 Temps ←

Station de mesurage



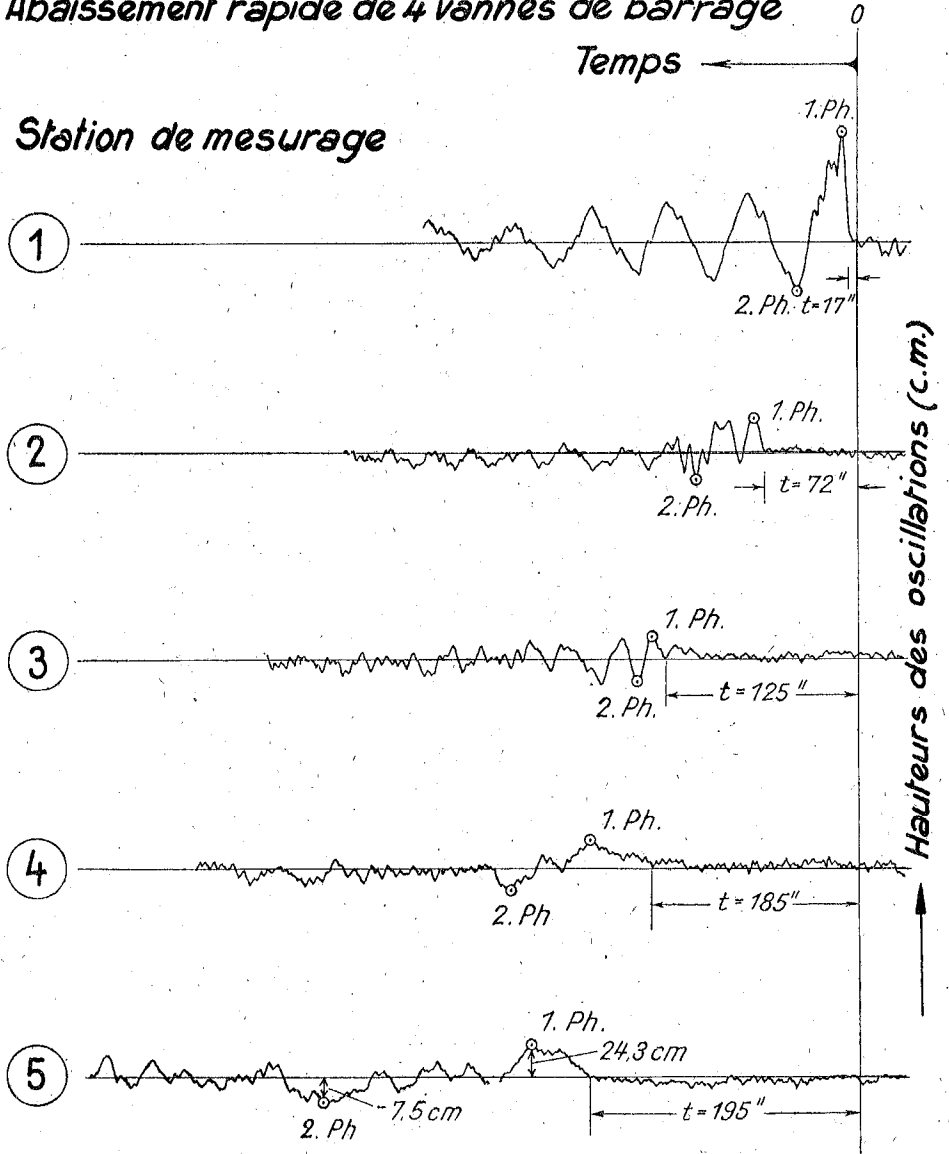
Action des vagues produites par le fonctionnement des centrales hydrauliques sur les mouillages des chenaux navigables. Développement d'une vague de relèvement dans le bief amont
 Arrêt de 4 Turbines
 Vannes du barrage en position de retenue
 Temps
 Station de mesurage
 Hauteurs des oscillations (c. m.)

Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen
 Verlauf einer Schwallwelle im Oberwasser

Ausfall von 4 Turbinen
 Wehrverschlüsse in Staustellung
 Zeit
 Meßpunkte
 Schwallhöhen (cm)

Abb. 2. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

$Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$
Arrêt de 4 Turbines
Abaissement rapide de 4 vannes de barrage



Action des vagues produites par le fonctionnement des centrales hydrauliques sur les mouillages des chenaux navigables. Développement d'une vague de relèvement dans le bief amont
 Arrêt de 4 Turbines
 Abaissement rapide de 4 vannes de barrage
 Temps
 Station de mesure
 Hauteurs des oscillations (c. m.)

Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen
 Verlauf einer Schwallwelle im Oberwasser

Ausfall von 4 Turbinen
 Schnellsenken von 4 Wehrverschlüssen
 Zeit
 Meßpunkte
 Schwallhöhen (cm)

Abb. 2. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

fahrt in den oberen Vorhafen erzeugt der Wasserspiegelunterschied zwischen Strom und Vorhafen eine in den Vorhafen einlaufende Schwallwelle, deren Wassermasse der Hebungswelle im Strom entnommen wird und ihre Höhe etwa im Verhältnis von Strom- zu Vorhafenbreite vermindert.

Die Sunkwelle ist den gleichen Ausbreitungs- und Verformungsvorgängen unterworfen wie die Schwallwelle. Da aber die Sunkwelle mit der Strömung und schneller als die Schwallwelle läuft, die sich gegen die Strömung fortbewegen muß, ruft die Sunkwelle im allgemeinen geringere Absenkungen hervor, als die Schwallwelle Hebungen verursacht. Auch hat die Sunkwelle die Tendenz, rascher zu verflachen als die Schwallwelle, die auf sehr lange Strecken ihre Form und Höhe beibehalten kann.

Ausfall von vier Turbinen ($Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$).

Zur Erläuterung werden Einzelheiten der Ergebnisse mitgeteilt, bei denen die vier Turbinen ohne Anwendung von Maßnahmen gegen die Schwall- und Sunkerscheinungen in der Schließzeit bis auf die Leerlaufwassermenge geschlossen wurden. Der zeitliche Verlauf der Wasserspiegelbewegung ist für die fünf besonders kennzeichnende Meßpunkte 1 bis 5 in Abb. 2 dargestellt. Die größten Werte der ersten Hebung — erste Phase — sind für alle Meßstellen im Oberwasser (1 bis 22) in Abb. 1a eingetragen. Die Verbindungslinien gleicher Höhen eines Schwalldurchganges ergeben eine räumliche Fläche, die aber zu keinem Zeitpunkt die wirkliche Gestalt des Wasserspiegels darstellt, sondern nur den Verlauf der Schwallhöhen erkennen läßt.

Nach Abb. 1a laufen die größten Hebungen vom Kraftwerk aus quer über den Strom nach dem rechten Ufer (Querschnitt F) und werden dort nach dem oberen Trennkopf zu reflektiert.

Den Kurven der Abb. 2 ist die Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels mit im Mittel 1 cm/s und die gewellte Form des Schwallrückens zu entnehmen. Mit der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit des Schwalles von $8,0 \text{ m/s}$ ergibt sich die mittlere Neigung der Schwallfront zu $1 : 800$. Ein in gleicher oder entgegengesetzter Richtung der Schwallwelle fahrendes Schiff erfährt durch die Welle eine Kraft von $1/800$ des Schiffsgewichtes.

Hervorzuheben ist der Verlauf der Schwallwelle im oberen Vorhafen. Sie wird am Trennkopf durch die sich verengende Einfahrt etwas aufgehört, läuft in dieser Höhe der Schleuse zu und wird am Oberhaupt in nahezu doppelter Höhe reflektiert (Abb. 2 Meßpunkt 5 gegen 3). Beim Rücklauf des reflektierten Schwalles liegt zeitweise der Wasserspiegel im Vorhafen höher als im Strom, so daß eine Sunkwelle in den Vorhafen eindringt, die die vorhergehende Verdoppelung der Hebung wieder nahezu rückgängig macht. Durch die sich abwechselnden Schwall- und Sunkwellen entsteht im Vorhafen eine nur schwach gedämpfte Wasserspiegel-schwingung. Sie ist bedeutsam bei den großen Wassermengen von $2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

In gleicher Weise wie die Schwallwellen sind die größten Höhen der Sunkwelle auf Abb. 1a dargestellt. Die Sunktiefen im Unterwasser sind durchschnittlich etwas kleiner als die Schwallhöhen im Oberwasser. Sie verflachen sich rasch. Ihre größte Höhe nimmt vom Querschnitt C von -45 cm nach A auf -20 cm ab. Im unteren Vorhafen verdoppeln sich die Sunktiefen zwischen Trennkopf und Unterhaupt. Auch hier ist schon vor Eintreffen der Sunkwelle eine Grundschwingung des Wasserspiegels vorhanden, zu der sich die Sunkwelle addieren kann. In Abb. 3 ist der zeitliche Verlauf der Wasserspiegelbewegung an den kennzeichnenden Meßstellen dargestellt.

Maßnahmen zur Dämpfung der Schwall- und Sunkwellen.

Beim Ausfall der Turbinen und Generatoren des Kraftwerks bestehen drei Möglichkeiten, die Schwall- und Sunkerscheinungen zu vermeiden oder zu dämpfen.

Die Turbine wird weiterhin voll beaufschlagt und gibt ihre Wassermenge ohne Verzögerung an das Unterwasser ab. Die Leistung des Generators wird auf Wasserwiderstände geleitet und in Wärme umgesetzt.

Neben oder unter der Turbine ist ein besonderer Durchflußkanal für die Turbinenwassermenge angeordnet. Er wird bei Ausfall der Generatoren sofort geöffnet, so daß keine oder nur geringe Hebungen und Senkungen der Wasserspiegel eintreten.

Der Schwall wird durch Schnellsenken der Wehrverschlüsse so weit wie möglich abgefangen, so daß sich die Schwallhöhen und Sunktiefen beträchtlich vermindern.

Nur die letztgenannte Möglichkeit ist untersucht worden. Gleichzeitig mit dem Ausfall der Turbinen werden die Wehrverschlüsse soweit gesenkt, daß die ausfallenden Wassermengen (Schluckwassermenge — Leerlaufwassermenge) über das Wehr abfließen können, wobei der Oberwasserspiegel im räumlichen und zeitlichen Mittel auf der Höhe des Stauziels gehalten wird. Für eine ausgefallene Turbine wird jeweils ein Wehrverschluß gesenkt, so daß beim Abschluß der vier Turbinen einer der fünf Verschlüsse, nach den Versuchsergebnissen am zweckmäßigsten Verschluß V, als Reserve in Staustellung bleibt. Die Verschlüsse können mit 15 cm/s (Natur) auf 3,70 m Tiefe abgesenkt werden.

Ausfall von vier Turbinen, Schnellsenken von vier Wehrverschlüssen ($Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$).

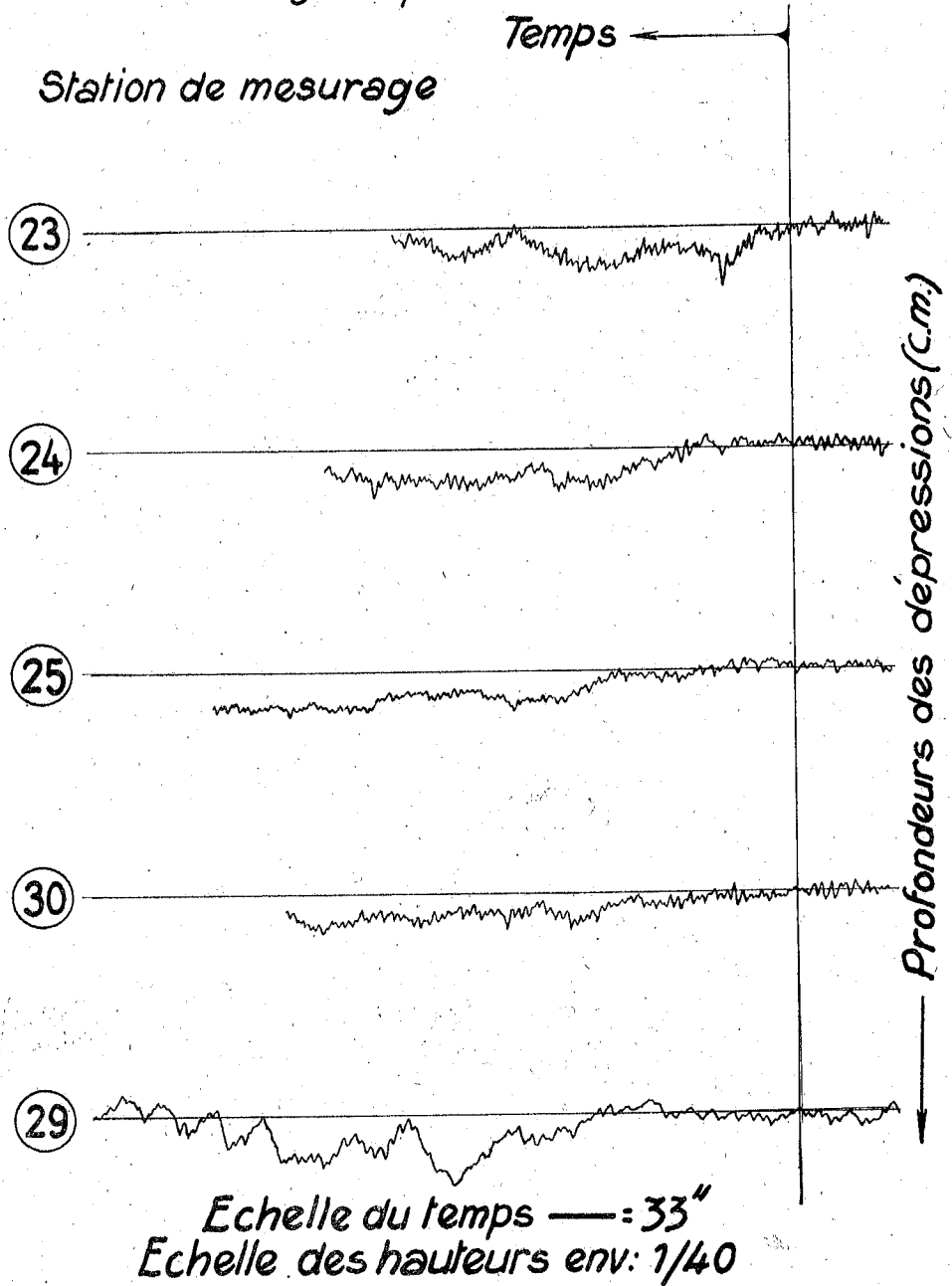
Die Wirkung des Schnellsenkens von Wehrverschlüssen soll wiederum an den Ergebnissen einer Untersuchung gezeigt werden, bei der die vier mit zusammen $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ beaufschlagten Turbinen ausfallen, während die vier Wehrverschlüsse I bis IV gleichmäßig um das erforderliche Maß von 3,28 m schnellgesenkt werden.

Die Veränderung der Schwallwellen im Oberwasser ist aus Abb. 2 erkennbar. Auf die Hebungswelle (1. Phase) folgt überall eine Senkungswelle (2. Phase), wobei der tiefste Punkt mit größer werdender Entfernung vom Kraftwerk sich zeitlich von der größten Hebungsspitze entfernt. Am oberen Ende des Vorhafens (Meßpunkt 5) entstehen Höhenbewegungen des Wasserspiegels, die durchschnittlich nicht wesentlich größer sind als an der oberen Vorhafeneinfahrt (Meßpunkt 3). Durch Addieren der Schwallhöhen zu der im oberen Vorhafen schon vorhandenen Wasserspiegelschwingung können auch größere Werte auftreten.

In der gleichen Weise wie bei Abb. 1 a sind in den Abb. 1 b und 1 c die Höhen der ersten und zweiten Phase der Wasserspiegelschwingungen aufgetragen. Im Oberwasser, einschließlich des oberen Vorhafens, werden die Größtwerte der Schwallhöhen durch das Schnellsenken auf weniger als die Hälfte der Werte der Abb. 1 a vermindert. In der zweiten Phase, der Sunkwelle, sinkt der Wasserspiegel durchweg unter die Ausgangslage. Die Höhe der Schwallwellen im Schiffahrtsweg des Oberwassers überschreitet 15 cm nicht, die Tiefe der Sunkwelle erreicht — 10 cm. Im oberen Vorhafen werden die Sunktiefen nicht größer, die Schwalle laufen bis zu 25 cm am Oberhaupt auf (Tabelle 1).

Im Unterwasser verflacht sich die Sunkwelle (1. Phase, Abb. 1 b) sehr rasch und wird im Schiffahrtsweg bedeutungslos. Am Untertor der Schleuse werden noch — 16,2 cm erreicht. Die Schwallhöhen (2. Phase, Abb. 1 c) sind zwar größer als die Sunktiefen (Tabelle 1). Ihr Größtwert liegt jedoch außerhalb des Schiff-

$Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$
 Arrêt de 4 Turbines
 Vannes du barrage en position de retenue 0

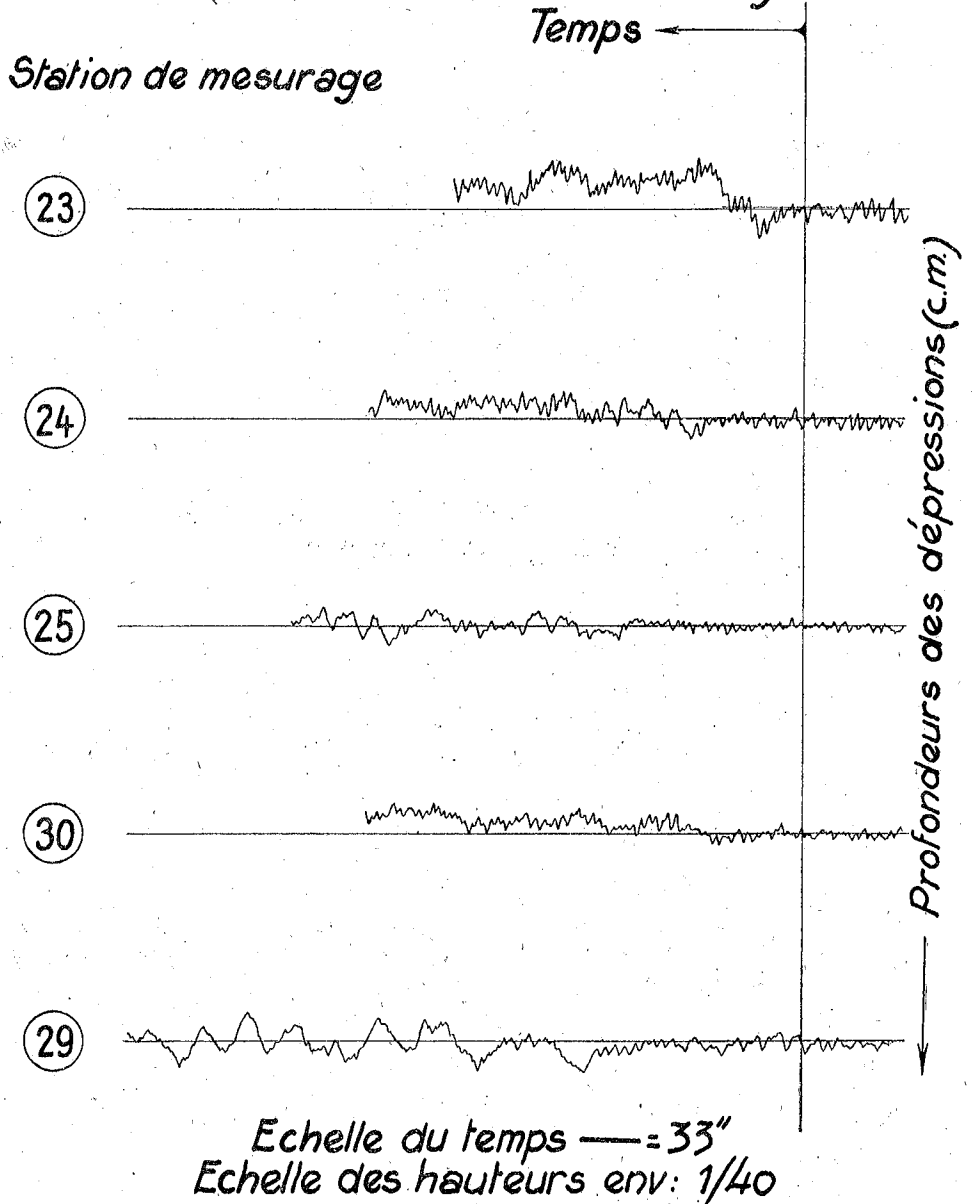


Action des vagues produites par le fonctionnement des centrales hydrauliques sur les mouillages des chenaux navigables. Développement d'une vague de dépression dans le bief aval
 Arrêt de 4 Turbines
 Vannes du barrage en position de retenue
 Temps
 Station de mesurage
 Profondeurs de dépressions (c. m.)
 Echelle du temps — = 33"
 Echelle des hauteurs env. : 1/40

Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen
 Verlauf einer Sunkwelle im Unterwasser
 Ausfall von 4 Turbinen
 Wehrverschlüsse in Staustellung
 Zeit
 Meßpunkte
 Sunkttiefen
 Maßstab der Zeit — = 33"
 Maßstab der Höhen etwa: 1/40

Abb. 3. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

$Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$
 Arrêt de 4 Turbines
 Abaissement rapide de 4 vannes de barrage



Action des vagues produites par le fonctionnement des centrales hydrauliques sur les mouillages des chenaux navigables. Développement d'une vague de dépression dans le bief aval

Arrêt de 4 Turbines
 Abaissement rapide de 4 vannes de barrage

Temps
 Station de mesurage

Profondeurs de dépressions (c. m.)

Echelle du temps — = 33''

Echelle des hauteurs env. : 1/40

Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen
 Verlauf einer Sunkwelle im Unterwasser

Ausfall von 4 Turbinen
 Schnellsenken von 4 Wehrverschlüssen

Zeit

Meßpunkte

Sunktiefen

Maßstab der Zeit — = 33''

Maßstab der Höhen etwa: 1/40

Abb. 3. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

fahrtsweges (Meßpunkt 26). Nach Abb. 3 verlaufen die Kurven sehr aufgelockert. Lediglich am Meßpunkt 23 unterhalb des Krafthauses und bei Meßpunkt 29 am Untertor der Schleuse steigt der Wasserspiegel trotz der von $-60,2$ auf $-16,2$ cm verminderten Sunktiefe mit $1,8$ cm/s steil an. Die Neigung ist größer als die beim Schwall ohne Schnellsenken der Verschlüsse genannte, das absolute Maß der Wasserspiegeldifferenz jedoch geringer.

Vorgänge beim Abfluß von $Q = 2500$ m³/s.

Bei $Q = 2500$ m³/s wird die Schifffahrt im Strom eingestellt. Trotz der geringen Häufigkeit dieser Abflußmenge und der ebenso geringen Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls von vier Turbinen, ist die Untersuchung wichtig für die Beurteilung der Möglichkeiten einer Störung der Schifffahrt.

Von der Abflußmenge des Stromes mit 2500 m³/s schlucken die Turbinen 1130 m³/s. Bei Ausfall der Turbinen werden hiervon 1030 m³/s im Oberwasser zurückgehalten und etwa 330 m³/s über die schon für den stationären Abfluß gesenkten Verschlüsse zusätzlich in das Unterwasser abgeleitet. Die Schwallhöhen werden also nur von 700 m³/s oder 28% der Abflußmenge des Stromes hervorgerufen. Diesen günstigen Elementen steht entgegen, daß bei $Q = 2500$ m³/s sich die Schwallwelle im Oberwasser gegen eine größere Strömungsgeschwindigkeit fortpflanzen muß und ihre Höhe vergrößert.

Im oberen Vorhafen wird der Wasserspiegel auf nahezu 75 cm gehoben. Das Maß ist nicht nur auf die größere Hebung an der Vorhafeneinfahrt zurückzuführen. Es beruht vor allem darauf, daß im oberen Vorhafen schon vor Eintreffen des Schwalles eine bedeutende Wasserspiegelschwingung vorhanden ist. Da diese Grundschwingung und die Schwallchwingung die gleiche Periode besitzen, ist die resultierende Schwingung harmonisch und sehr beständig.

Bei den Sunktiefen im Unterwasser ist auffallend, daß sie kleiner als die Schwallhöhen im Oberwasser, aber auch kleiner als die Sunktiefen bei $Q = 1300$ m³/s sind. Am Untertor der Schleuse (Meßpunkt 29) ist auch bei $Q = 1300$ m³/s schon eine schwache Wasserspiegelschwingung vor Eintreffen der Sunkwelle vorhanden. Bei $Q = 2500$ m³/s ist diese Schwingung wesentlich größer und läßt sich auch noch nach dem Eintreffen der Sunkwelle erkennen.

Beim stationären Abfluß von 2500 m³/s im Strom und der Turbinenwassermenge 1130 m³/s fließen über die fünf gleichmäßig geöffneten Wehrfelder 1370 m³/s ab. Hierfür sind die Oberschütze um $3,10$ m unter Stauziel zu senken, so daß nur noch $0,60$ m für das Schnellsenken von vier Oberschützen verbleibt. Dieses Maß ergab keine nennenswerten Verbesserungen der Schwallhöhen und Sunktiefen. Selbst beim Absenken aller fünf Oberschütze auf das tiefste Absenkmaß von $4,00$ m können 2500 m³/s, vermindert um die Leerlaufwassermenge der Turbinen, zusammen 100 m³/s, nicht mehr durch die fünf Oberschütze abgeführt werden. Es muß bei $Q = 2500$ m³/s der Abfluß schon bei stationärem Abfluß und vor dem Ausfall der Turbinen durch Anheben der Unterschütze geregelt werden.

Stehen im Extrem die fünf Oberschütze in Staustellung und sind die vier Unterschütze I bis IV um $1,63$ m für den stationären Abfluß gehoben, dann können die Oberschütze mit einem Schnellsenkmaß von $2,07$ m die Schwall- und Sunktiefen der ersten und zweiten Phase am Schleusenoberhaupt bis auf $+42$ cm und $-0,9$ cm verändern (Tabelle 1). Die Schwallhöhe wird also auf etwa die Hälfte vermindert. Auch an den übrigen Meßstellen des Schifffahrtsweges ist die Schwallhöhe erheblich verkleinert. Bei $Q = 2000$ m³/s werden die Unterschütze für den stationären Abfluß um $1,12$ m gehoben. Die Oberschütze

können im Schnellsenken um 2,58 m gesenkt werden, wobei die Schwallhöhen am Oberhaupt der Schleuse auf 26,3 zurückgehen (Tabelle 1). Weitere Untersuchungen mit $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ bei anderen Kombinationen der Bewegung von Ober- und Unterschütze ergaben die Notwendigkeit, die Unterschütze schon bei Stromwassermengen unter $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ im stationären Betrieb zu verwenden, um genügend Absenkmaß für das Schnellsenken der Oberschütze zu behalten.

Bei den gleichen Betriebsvorgängen sind die Sunktiefen im Unterwasser und insbesondere am Unterhaupt der Schleuse nicht größer als bei den kleineren Abflußmengen (Tabelle 1).

Wirkung des Schnellsenkens der Oberschütze auf Schwall und Sunk.

Da die Schifffahrt in erster Linie von den Wirkungen im oberen und unteren Vorhafen und an den Schleusenhäuptern berührt wird, sind in Abb. 4 die Ergebnisse der Untersuchungen für den Meßpunkt 5 am Schleusen-Oberhaupt und den Meßpunkt 29 am Schleusen-Unterhaupt dargestellt.

Im Oberwasser ergibt sich für die Schwallhöhen ohne Schnellsenken der Wehrverschlüsse der Linienzug 1 mit seinem Größtmaß von 74,9 cm bei $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Sunktiefen der zweiten Phase sind nicht dargestellt, da sie bei den großen Tiefen des Oberwassers von untergeordneter Bedeutung sind. Beim Schnellsenken der Verschlüsse deutet der Linienzug 2 im Bereich der Abflußmengen 500 bis $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ auf bedeutende Verminderungen der Schwallhöhen hin. Im räumlichen und zeitlichen Mittel kann das Stauziel durch das Schnellsenken von vier Oberschützen allein nur bis $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ gewahrt bleiben. Mit dem fünften Wehrverschluß und dem langsamen Absenken der vier schon tiefen Schütze um 0,30 m läßt sich bis $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ das Stauziel noch halten. Der Linienzug 3 weist jedoch erhebliche Schwallhöhen auf und geht bei $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Linienzug 1 über, da bei dieser Abflußmenge die Schwallhöhen durch Senken der Oberschütze allein nicht mehr beeinflußt werden können.

Um ein möglichst großes Maß an schnell absenkbarer Höhe der Oberschütze zu wahren, ist es zweckmäßig, schon bei $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ die vier Unterschütze anzuheben. Die erzielbare Verminderung der Schwallhöhen ist nach dem Linienzug 5 bis $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ beträchtlich, so daß zwischen $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ und $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ wesentliche Unterschiede der Schwallhöhe nicht bestehen. Über $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ nehmen die Höhen jedoch wieder zu. Die Höhe bei $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ist als Summe der Schwallhöhe und der Höhe der Grundschwingung entstanden. Die Grundschwingung nimmt mit zunehmender Wassermenge zu und ist durch das Schnellsenken der Verschlüsse nicht zu beeinflussen.

Für das Unterwasser stellt der Linienzug 1 die größten Sunktiefen am Schleusenunterhaupt dar, die ohne Schnellsenken der Verschlüsse auftreten. Bis $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ wird durch das schnelle Absenken von vier Oberschützen um die Höhe, die für das Stauziel erforderlich ist, eine beträchtliche Verminderung der Sunktiefen erreicht (Linienzug 2). Bei den für das Oberwasser genannten Bewegungsvorgängen der Verschlüsse ändern die Sunktiefen ihre Größe bis $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ nur unwesentlich. Erst über dieser Abflußmenge, (Linienzug 3) nähern sich die Sunktiefen rasch den Werten des Linienzuges 1. Es ist daher auch für das Unterwasser zweckmäßig, bei Abflußmengen über $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ die Unterschütze zu heben, wodurch die Sunktiefen nach dem Linienzug 5 vermindert werden können.

Die Verbesserungen für die Schifffahrt durch das Schnellsenken der Oberschütze müssen noch nach der Häufigkeit der Abflussmengen beurteilt werden. Nach der Dauerlinie der Abb. 4 treten die Wasserführungen über 1600 m³/s, bei denen die Unterschütze zu heben sind, nur an rund 30 Tagen ein. An den übrigen 335 Tagen genügt allein das Schnellsenken der Oberschütze, um die Schwallhöhen und Sunktiefen in Bereichen zu halten, die eine Störung der Schifffahrt nicht verursachen. Die große Höhe des Schwalles bei 2500 m³/s tritt im Mittel etwa an einem Tag des Jahres auf.

Schwall- und Sunkwelltiefen in der Schleusenammer.

Die großen Schwallhöhen am Obertor der Schleuse führten zur Frage nach der Höhe und der Wirkung der Schwallhöhe in der der Kammer bei geöffnetem Obertor. Am Meßpunkt 22 in der Nähe des geschlossenen Untertores (Abb. 1) wurde für den extremen Fall des Hochwassers mit Q = 2500 m³/s und ohne Senken der Wehrverschlüsse eine Hebung des Wasserspiegels um 85 cm festgestellt. Der Anstieg des Wasserspiegels ist beim Meßpunkt 22 wesentlich steiler als bei Punkt 5. Es war hierbei belanglos, ob die Kammer mit einem Schiff belegt oder unbelegt war. Ein frei in der Schleusenammer liegender 2000-t-Kahn geriet durch die Schwallwelle in eine regelmäßige schwingende Längsbewegung. Aus Weg und Zeit dieser Bewegung errechnet sich eine Kraft von 3,6 t = 1/300 des Eigengewichtes, die auf den Kahn durch die Schwallwelle ausgeübt wird. Bei kleineren Abflussmengen vermindert sich die Zunahme der Schwallhöhe in der Kammer. Sie ist bei 1300 m³/s nicht mehr von der Höhe im oberen Vorhafen (Meßpunkt 5) verschieden. Werden die Wehrverschlüsse dem Linienzug 5 der Abb. 4 entsprechend bedient, so erreichen die Schwallwellen am geschlossenen Untertor (Meßpunkt 22) keine Höhen, die wesentlich größer sind als im oberen Vorhafen.

Im Unterwasser war festzustellen, daß bei geöffnetem Untertor die Sunktiefen am Obertor (Meßpunkt 31, Abb. 1) etwa die gleichen Größen erreichen wie bei geschlossenem Untertor am Meßpunkt 29. Bei geöffneter Kammer wird die Reflexion des Sunkes nur an das Oberhaupt verschoben, wobei am Unterhaupt wesentlich kleinere Schwallhöhen eintreten. Mit den Betriebsvorgängen des Linienzuges auf Abb. 4 werden aber auch die Sunktiefen in der Kammer vom Unterwasser her in Grenzen gehalten, die die Schifffahrt nicht stören.

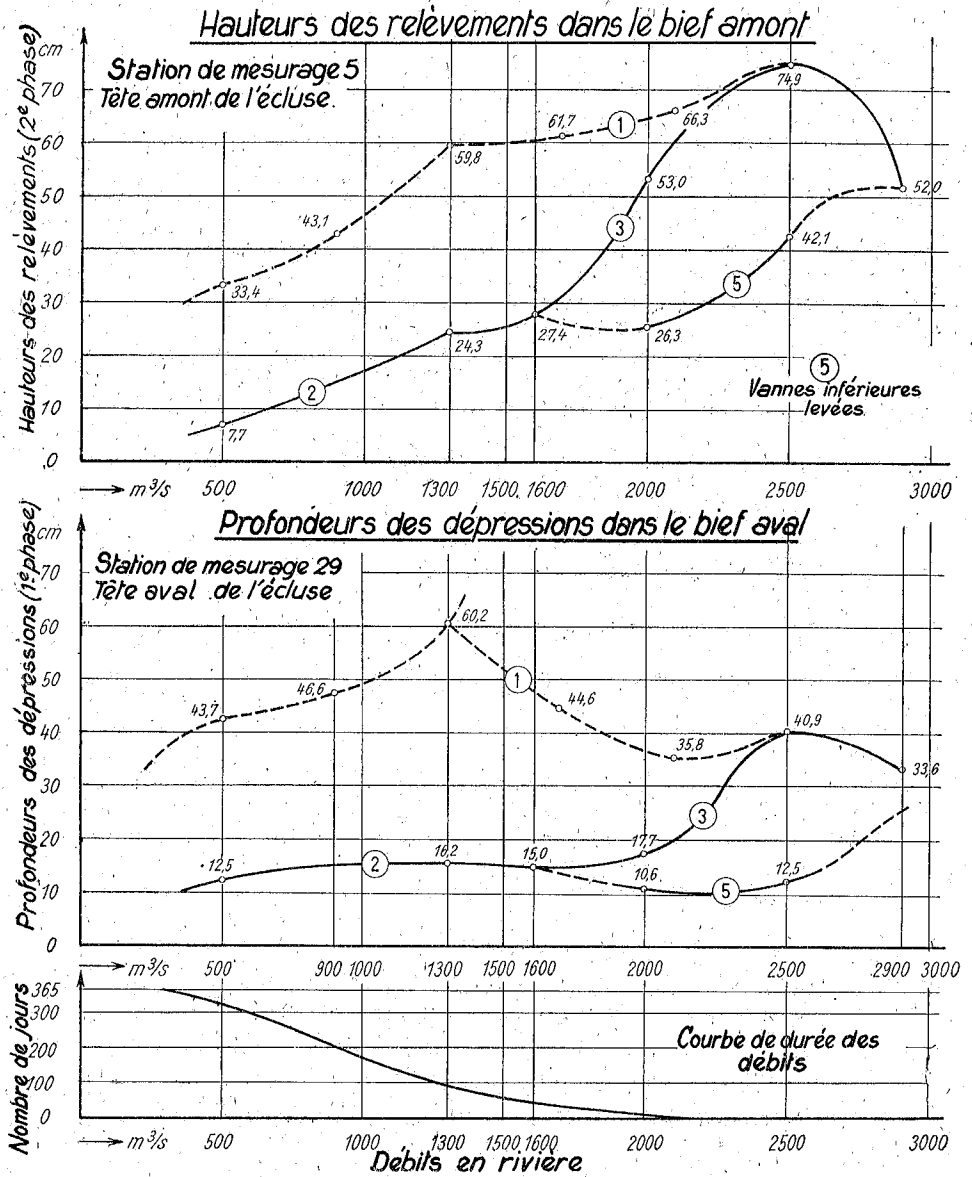
Die zweite Phase.

Die Abb. 4 konnte wegen der Übersichtlichkeit nur die Vorgänge in der ersten Phase des Schwalles oder Sunkes darstellen. Die zweite Phase, der Sunk im OW und der Schwall im UW, ergibt für die kennzeichnenden Meßpunkte 5 am geschlossenen Obertor und 29 am geschlossenen Untertor die nachstehenden Werte:

Tabelle 1.

Schwallhöhen und Sunktiefen in cm der ersten und zweiten Phase
Ausfall der Turbinen mit Schnellsenken der Oberschütze

| Q m ³ /s | 500 | | 1 300 | | 1 600 | | 2 000 | | 2 500 | |
|----------------------------|---|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|
| Phasen | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Meßpunkt 5 im OW | — 7,1 + 7,2 + 24,3 — 7,5 + 27,4 — 1,2 + 26,3 — 8,1 + 42,1 — 0,9 | | | | | | | | | |
| Meßpunkt 29 im UW | — 12,5 + 11,7 — 16,2 + 22,4 — 15,0 + 26,5 — 10,6 + 17,4 — 12,5 + 17,5 | | | | | | | | | |



| | |
|---|--|
| Hauteurs des relèvements dans le bief amont | Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen |
| Station de mesure | Meßpunkt |
| Tête amont de l'écluse | Schleusen-Oberhaupt |
| Hauteurs des relèvements | Schwallhöhen |
| Vannes inférieures levées | Unterschütze gehoben |
| Profondeurs des dépressions dans le bief aval | Sunktiefen im Unterwasser |
| Tête aval de l'écluse | Schleusen-Unterhaupt |
| Profondeurs des dépressions | Sunktiefen |
| Nombre de jours | Anzahl der Tage |
| Débits en rivière | Abflußmengen im Strom |
| Courbe de durée des débits | Abflußmengendauerlinie |

Abb. 4. Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen.

Während im oberen Vorhafen (Meßpunkt 5) bei allen Abflußmengen der Hebung durch die Schwallwelle nur unbedeutende Tiefen des Sunkes unter dem Ausgangswasserspiegel folgen, übertreffen im Unterwasser die dem Sunk der ersten Phase folgenden Schwallhöhen durchweg die Sunktiefen, so daß sich bei $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ ein Unterschied zwischen tiefstem und höchstem Punkt von 41 cm ergibt. Diese, wie schon erwähnt steilen Wasserspiegelschwankungen folgen rasch aufeinander. Sie sind zwar für die Schifffahrt nicht störend, mahnen aber besonders bei der Ausfahrt aus der Kammer nach dem Unterwasser zur Vorsicht.

Bewertung der Höhen von Schwall und Sunk.

In den Abb. 1 und 4 und in der Tabelle für die beiden Phasen sind mit Absicht die Werte der Schwallspitze und der Sunktiefe, so wie sie den Abb. 2 und 3 entnommen werden können, angegeben, auch wenn sie nur kurz auftreten. Die mittleren und für die praktische Verwendung maßgebenden Höhen des Schwallrückens und des Sunktales sind kleiner als die Spitzenwerte. Der im Schreibgerät aufgenommene Verlauf von Schwingungen der Wasserspiegel wie in den Abb. 2 und 3 macht es möglich, das Verhältnis von Mittelwert zu Spitzenwert festzustellen. Es ist beim oberen Vorhafen der Mittelwert gleich dem Spitzenwert geteilt durch 1,26, im unteren Vorhafen sind die Spitzenwerte durch 1,38 zu dividieren, um die Mittelwerte zu erhalten. Dadurch wird beispielsweise der oben genannte größte Unterschied von 41 cm bei $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ auf 30 cm reduziert. Die Unterschiede der beiden Phasen werden bei den Mittelwerten wesentlich gemildert und können von der Schifffahrt nicht mehr als störend empfunden werden.