

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 34

Artikel: Kraftwerkschwalle und Schifffahrt (Modellversuche für das Rheinkraftwerk Birsfelden)
Autor: Wittmann, H. / Bleines
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60606>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Kraftwerkschwalle und Schifffahrt (Modellversuche für das Rheinkraftwerk Birsfelden)

Von Prof. Dr.-Ing. H. WITTMANN und Priv. Doz. Dr.-Ing. BLEINES, Karlsruhe¹⁾

DK 621.311.21 (494.232).001.5

1. Einleitung

An der Staustufe Birsfelden²⁾ mit dem Grundriss nach Bild 1 können durch den plötzlichen Ausfall von einer bis vier Maschinen des Kraftwerks Absperrschwalle und -sunke entstehen, die sich in die Vorhäfen und in geöffnete Schleusen-kammern fortpflanzen und dadurch den Schifffahrtsbetrieb beeinträchtigen. Bei der Lage der Stufe Birsfelden zwischen den Basler Häfen und der Birsfelder Hafenanlage kam einer Untersuchung über die Vorgänge und Einflüsse auf die Schifffahrt besondere Bedeutung zu.

Die Berechnung der Schwall- und Sunkerscheinungen stiess bei dem unregelmässigen Grundriss der Wasserfläche nach Bild 1 auf Schwierigkeiten. Die Verformungen der Schwallwelle, sowie ihre Umbildung im unteren und oberen Vorhafen konnten zwar abgeschätzt, nicht aber ausreichend genau bestimmt werden. Es wurden daher wasserbauliche Modellversuche im Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium der Techn. Hochschule Karlsruhe ausgeführt mit dem Zweck, den Verlauf der Schwall- und Sunkwellen bei kennzeichnenden

Abflüssen und Betriebsvorgängen des Kraftwerks festzustellen und Massnahmen zu entwickeln, durch die ein schädlicher Einfluss auf den Schifffahrtsbetrieb verhindert werden konnte. Der Masstab des Modells mit 1:65 war durch die Aufgabe, die erforderliche Ausdehnung des Modells und den vorhandenen Raum gegeben (Bild 2). Für die Feststellung der raschen Wasserstandsänderungen wurde ein trägheitsfreies Messgerät angewendet, das durch elektrische Widerstandsmessung die Bewegungen des Wasserspiegels auf Spiegelgalvanometer mit empfindlichem Ausschlag übertrug und den Verlauf der Schwall- und Sunkwellen durch ein besonderes Schreibgerät registrierte. Die Uebertragung der gemessenen Modellwerte in die Natur erfolgt nach dem Froudeschen Aehnlichkeitsgesetz, da die Bewegungen des Wasserspiegels bei den Schwall- und Sunkwellen nur durch Trägheits- und Schwerekräfte hervorgerufen werden.

Für die Modellversuche waren folgende Merkmale der Staustufe kennzeichnend: Wehr: 5 Oeffnungen von je 27,0 m Weite; Doppelhakenschütze mit 11,25 m Konstruktionshöhe³⁾, Kraftwerk: 4 Turbinen mit einer Vollwassermenge $Q_v =$

1) 123. Arbeit aus dem «Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium» der Techn. Hochschule Karlsruhe. Die Verfasser schreiben nach deutschem Brauch «das Schütz», Mehrzahl «die Schütze».

2) Beschreibung des Ausführungsprojektes SBZ 1949, Nr. 37, S. 515*.

3) SBZ 1953, Nr. 25, S. 363*.

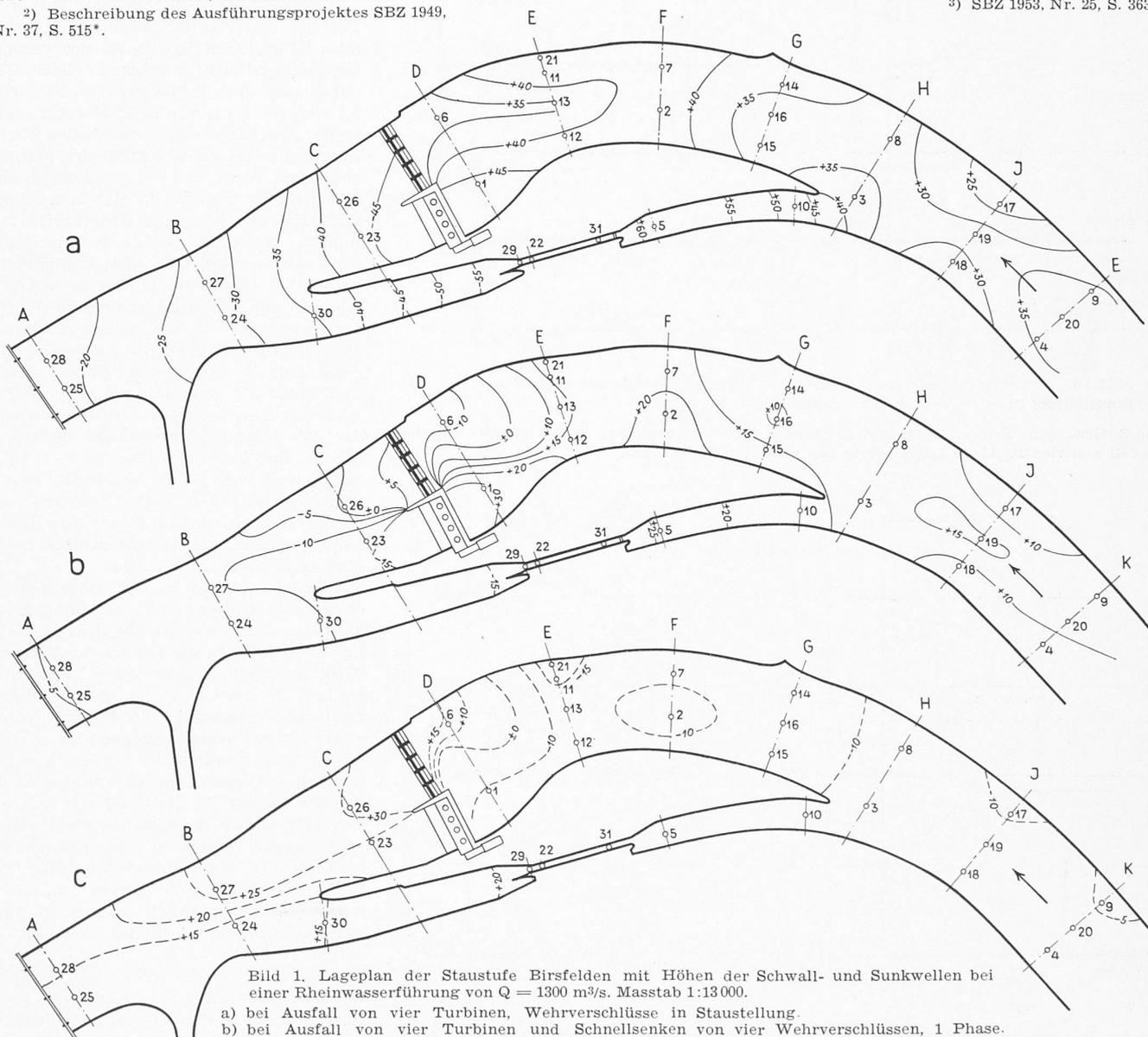


Bild 1. Lageplan der Staustufe Birsfelden mit Höhen der Schwall- und Sunkwellen bei einer Rheinwasserführung von $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$. Masstab 1:13 000.

- a) bei Ausfall von vier Turbinen, Wehrverschlüsse in Staustellung.
- b) bei Ausfall von vier Turbinen und Schnellsenken von vier Wehrverschlüssen, 1 Phase.
- c) wie b, 2. Phase.

Die Linien kennzeichnen die grössten Hebungen und Senkungen gegenüber dem Ausgangswasserspiegel; sie treten nicht gleichzeitig auf. Messpunkte 1 bis 22 im Oberwasser, 23 bis 31 im Unterwasser.

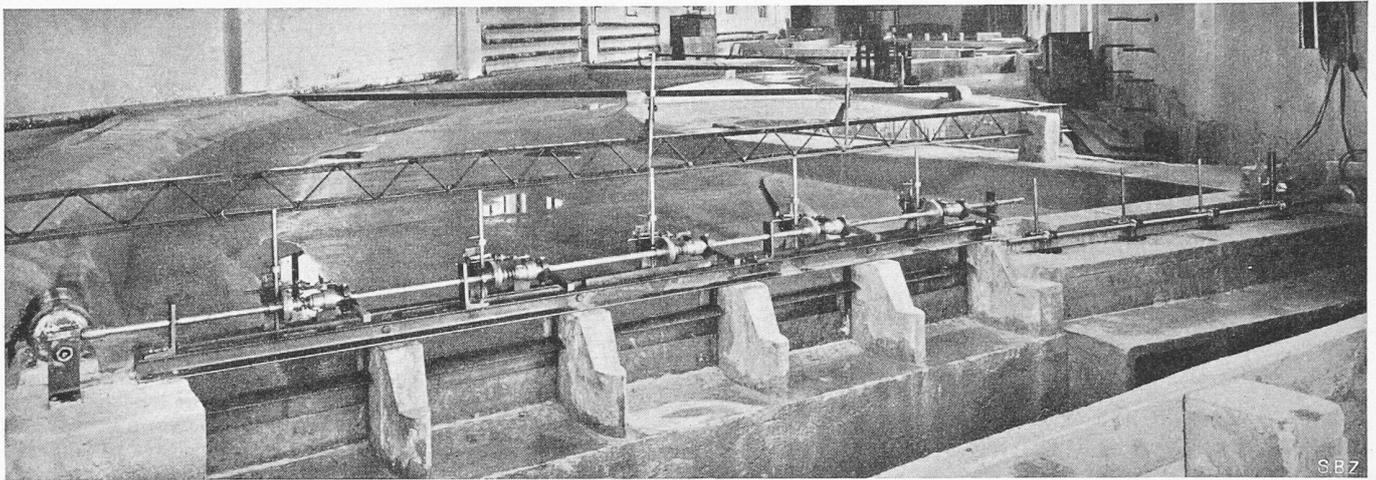


Bild 2. Modell der Staustufe Birsfelden im Masstab 1:65 im Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium in Karlsruhe.

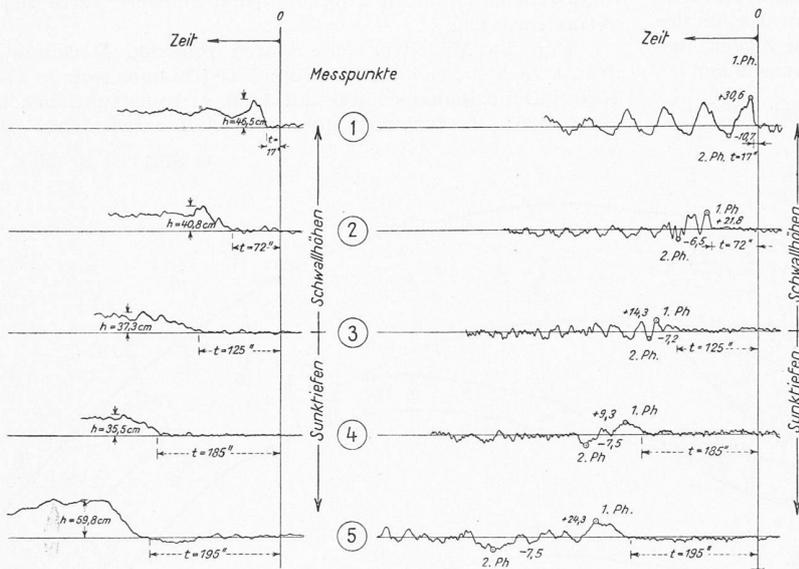


Bild 3 a. Wehrverschlüsse in Staustellung

Bild 3 b. Schnellsenken von vier Wehrverschlüssen.

Bild 3. Gemessene Schwallhöhen und Sunkttiefen im Oberwasser bei $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei Ausfall von vier Turbinen (Mittelwerte aus mehreren Versuchen).

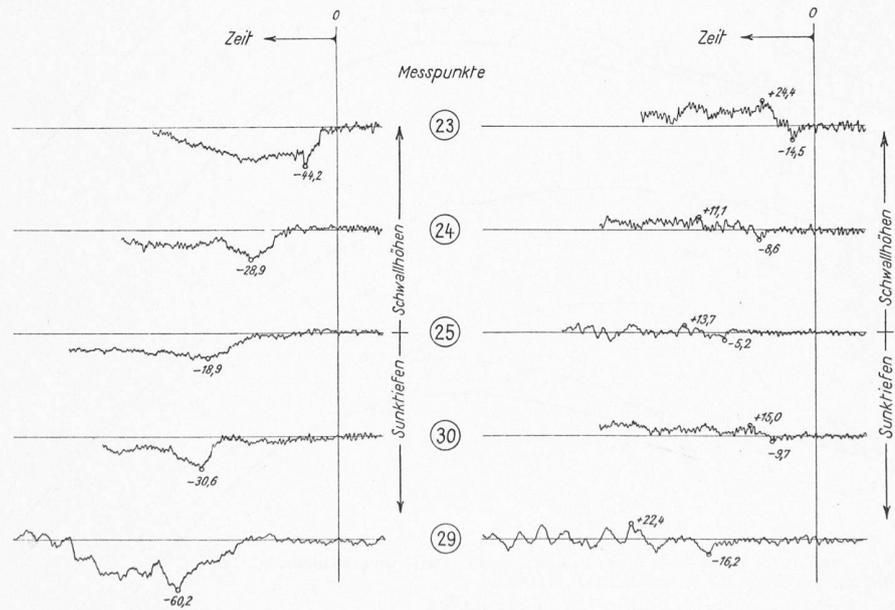


Bild 4 a. Wehrverschlüsse in Staustellung.

Bild 4 b. Schnellsenken von vier Wehrverschlüssen

Bild 4. Gemessene Schwallhöhen und Sunkttiefen im Unterwasser bei $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei Ausfall von vier Turbinen (Mittelwerte aus mehreren Versuchen).

1300 m^3/s . Schleuse: 180 m lang, 12 m breit. Fluss: $NQ = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, Q beim höchsten schiffbaren Wasserstand (Q_{H+dW}) = 2500 m^3/s .

2. Die Schwall- und Sunkvorgänge

Beim Abschluss verbleibt für jede Turbine eine Leerlaufwassermenge von etwa 25 m^3/s . Beträgt die Zuflusswassermenge Q_u , so wird die *Schwallwelle im OW* durch 1200 m^3/s hervorgerufen. Sie breitet sich (Bild 1a) von ihrer Entstehungsstelle, dem Kraftwerk, nach allen Richtungen der freien Wasserfläche, seitlich nach dem Wehr und stromaufwärts aus. Dabei nimmt sie etwa in gleichem Masse an Höhe ab, wie ihre Frontbreite zunimmt. Während des Laufs durch die Stromkrümmung wird die Wellenfront beim Auftreffen auf die Ufer reflektiert. Hieraus und durch die Unterschiede der Laufgeschwindigkeiten in den einzelnen Punkten der Wellenfront entsteht ein dauernder Wechsel von Form, Höhe und Richtung der Schwallwelle. Beim Abzweig des oberen Vorhafens erzeugt der Wasserspiegelunterschied zwischen Strom und Vorhafen eine in den Vorhafen eindringende Schwallwelle, deren Wassermasse der Hebungsmasse im Strom entnommen wird und ihre Höhe etwas vermindert. Die Schwallhöhe im oberen Vorhafen nimmt zu.

Die *Sunkwelle im UW* ist den gleichen Ausbreitungs- und Verformungsvorgängen unterworfen wie die Schwallwelle im OW. Da aber die Sunkwelle mit der Strömung und schneller als die Schwallwelle läuft, die sich gegen die Strömung fortbewegen muss, ist die Sunkwelle im allgemeinen einfacher aufgebaut und ruft geringere Absenkungen hervor, als die Schwallwelle Hebungen verursacht. Auch hat die Sunkwelle die Tendenz, rascher zu verflachen als die Schwallwelle, die auf sehr langen Strecken ihre Form und Höhe beibehalten kann. Bei der Einmündung des unteren Vorhafens entstehen die umgekehrten Erscheinungen wie im oberen Vorhafen. Die Sunkttiefen werden vergrößert.

Das Ausmass der Hebungen und Senkungen hängt in erster Linie von dem Betrag ab, um den die Abflussmengen des Stromes beim Ausfall der Turbinen vermindert werden. Die relativ geringe Wahrscheinlichkeit der gleichzeitigen

Drosselung von vier voll beaufschlagten Maschinen konnte nicht davon abhalten, diesen ungünstigen Betriebsfall zunächst den Untersuchungen zugrunde zu legen. Werden bei $Q_v = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ die vier Turbinen in der Schliesszeit bis auf die Leerlaufwassermenge geschlossen, dann werden an den fünf Messpunkten 1 bis 5 (Bild 1) die auf Bild 3a dargestellten Wasserspiegelbewegungen festgestellt. Die Wehrverschlüsse blieben in Staustellung. Mit zunehmender Entfernung vom Kraftwerk wird die Schwallhöhe geschwächt. Nur am Schleusenoberhaupt (Messpunkt 5) ist sie grösser als am Kraftwerk, weil die beim Messpunkt 3 in den oberen Vorhafen einlaufende Schwallwelle am Obertor der Schleusenkammer reflektiert wird und auf der von ihr selbst erzeugten Erhöhung zur Vorhafeneinfahrt zurückwandert. Sie verdoppelt dadurch nahezu ihre ursprüngliche Höhe und liegt bei der Rückkehr zum Strom zeitweise höher als der Wasserspiegel im Strom selbst, so dass anschliessend eine Sunkwelle in den oberen Vorhafen eindringt. Sie macht die Hebung etwa zur Hälfte wieder rückgängig. Durch die sich abwechselnden Schwall- und Sunkwellen entsteht im Vorhafen eine nur schwach gedämpfte Wasserspiegelschwingung. Sie ist bei Wassermengen im Rhein von $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ und mehr von besonderer Bedeutung.

Für das Unterwasser zeigt Bild 4a die Wasserspiegelbewegung an fünf kennzeichnenden Messpunkten. Es treten ähnliche Erscheinungen der Dämpfung und Reflexion auf wie im Oberwasser.

Die für sämtliche Messpunkte im OW und UW als kennzeichnend anzusehenden grössten Werte von Schwall und Sunk wurden in Bild 1a durch einen Höhenschichtplan dargestellt. Da die Grösstwerte nach den Bildern 3a und 4a an jedem Messpunkt zu einer andern Zeit auftreten, stellen die Höhenschichten in Bild 1a keine Wasserspiegelfläche dar, die zu irgend einem Zeitpunkt wirklich vorhanden ist, sondern lediglich eine Hüllfläche um die Grösstwerte der Wasserspiegelbewegungen im OW und UW. Aus den Linienzügen von Bild 3a ist die Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels von 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.

3. Massnahmen zur Dämpfung der Schwall- und Sunkwellen

Von den Möglichkeiten, die Schwall- und Sunkerscheinungen zu vermeiden oder zu dämpfen — Wasserwiderstände, besondere Durchflusskanäle für die Ausfallwassermenge, Schnellsenken der Wehrverschlüsse — wurde nur die letztgenannte in Betracht gezogen und untersucht. Die Oberschützen sind so ausgerüstet, dass ein Schnellsenkweg von max. $3,70 \text{ m}$ in 25 Sekunden durchfahren werden kann. Beim Ausfall einer oder mehrerer Maschinen wird die gleiche Anzahl Oberschütze gleichmässig um das Mass schnellgesenkt, das zur Ableitung der Ausfallwassermenge (= Schluckwasser — Leerlaufmenge) gerade ausreicht. Der OW-Stauspiegel wird im räumlichen und zeitlichen Mittel auf der Höhe des Stauziels gehalten. Da für die vier Maschinen fünf Schnellsenkschütze vorhanden sind, kann ein Verschluss in Reserve bleiben. Nach den Versuchen ist es am zweckmässigsten, unabhängig von der Lage der ausfallenden Turbine stets das dem Kraftwerk zunächst liegende Oberschütz zuerst zu senken, weil hierbei der gedrosselte Wasserstrom die geringste Ablenkung erfährt und auf dem kürzesten Wege einem Ueberfallschütz zugeführt wird.

4. Einfluss des Schnellsenkens der Wehrverschlüsse auf die Schwall- und Sunkhöhen

Die Wirkung des Schnellsenkens von vier Oberschützen beim Ausfall von vier Turbinen (Ausfallwassermenge = $1300 - 4 \times 25 \text{ m}^3/\text{s}$) ergibt sich aus den Bildern 3b und 4b sowie aus den Bildern 1b und 1c. Die Schwallhöhen werden erheblich verkleinert. Der vom Kraftwerk ausgehenden Schwallwelle im OW folgt jetzt eine vom Wehr ausgehende Sunkwelle. Sie macht sich im Bild 3b durch eine zweite Phase mit negativem Grösstwert bemerkbar. Im UW hebt ein Schwall den zunächst abgesunkenen Wasserspiegel wieder an (Bild 4b). In den Lageplänen werden die erste Phase (Bild 1b) und die zweite Phase (Bild 1c) unterschieden. Aus den Darstellungen ergibt sich folgende Wirkung des Schnellsenkens: Die Schwallhöhen im OW einschliesslich des oberen Vorhafens

werden in der ersten Phase auf weniger als die Hälfte vermindert. Die Sunktiefen der zweiten Phase erreichen an keiner Stelle die Schwallhöhen. Die Höhe der Schwallwellen im Schiffahrtsweg (Messpunkt 3) überschreitet 15 cm nicht, die Tiefe der Sunkwelle erreicht etwa 10 cm . Im oberen Vorhafen (Messpunkt 5) laufen Schwall bis zu 25 cm auf, die Sunktiefe wird 8 cm . Im UW verflacht sich die Sunkwelle sehr rasch und wird im Schiffahrtsweg bedeutungslos. Am Untertor der Schleuse wurden noch $16,2 \text{ cm}$ gemessen. Die Schwallhöhen, die etwas grösser als die Sunktiefen sind, haben ihren Grösstwert ausserhalb des Schiffahrtsweges (Messpunkt 26). Die Linienzüge der Hebungen und Senkungen verlaufen durch das Schnellsenken aufgelockerter. Lediglich unmittelbar ober- und unterhalb des Kraftwerkes (Messpunkte 1 und 23) steigt der Wasserspiegel noch steil an. Auch beim Messpunkt 29, am Untertor der Schleuse, ist ein steiler Anstieg von der Sunktiefe zur Schwallhöhe zu beobachten. Die Neigung ist annähernd gleich der beim Schwall ohne Schnellsenken genannten, das absolute Mass der Wasserspiegeldifferenz jedoch geringer.

Der Einfluss des Schnellsenkens der Oberschütze auf die Schwall- und Sunkhöhe ist für $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ als sehr günstig zu bezeichnen. Am Beispiel der kritischen Messpunkte an den Schleusenhauptern (5 und 29) ist in Bild 5 der Einfluss auch für die übrigen Abflussmengen gekennzeichnet. In Abhängigkeit von den Abflüssen des Rheins geben die gestrichelten Linien 1 die Schwallhöhen und Sunktiefen ohne Schnellsenken, während die Linien 2, 3 und 4 die durch das Schnellsenken gedämpften Wellenhöhen anzeigen.

Unter $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ können die Schwall- und Sunkhöhen durch das Schnellsenken auf praktisch bedeutungslose Werte verringert werden. Obwohl die Turbinen und Ausfallwassermengen allmählich kleiner werden, nehmen über $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ die Schwallhöhen ohne Schnellsenken mit den Rheinwassermengen noch zu, weil die Höhen der Schwall gegen die wachsenden Strömungsgeschwindigkeiten grösser werden. Die Sunktiefen im UW haben dagegen bei $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ den Grösstwert erreicht.

Das Schnellsenken der Oberschütze erfolgt bei Rheinwassermengen über $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht mehr aus der Staustellung, da die Oberschütze schon vor dem Ausfall der Maschinen zur Ableitung der Uebererschussmengen abgesenkt sind. Der für das Schnellsenken zur Verfügung stehende Weg von maximal

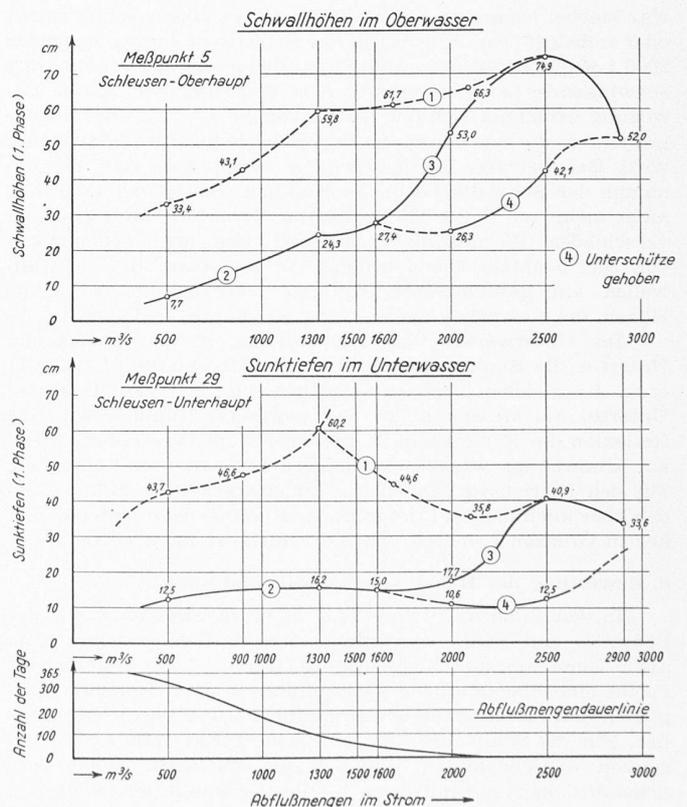


Bild 5. Schwallhöhen im Oberwasser (Punkt 5) und Sunktiefen im Unterwasser (Punkt 29) bei verschiedenen Wassermengen. 1 Wehrverschlüsse in Staustellung; 2, 3 und 4 Schnellsenken von vier Wehrverschlüssen.

3,70 m wird daher mit zunehmenden Rheinwassermengen immer mehr verkürzt. Bis etwa $Q_{Rh} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ reicht er aus, um auch nach dem Schnellsenken das Stauziel zu halten. Die weitere Absenkmöglichkeit von 0,30 m oder das Nachziehen der in Reserve stehenden Oberschütze haben keinen Einfluss mehr auf die Schwallhöhen. Es nehmen daher (Linien 3) beim Schnellsenkenbetrieb der Oberschütze die Werte für Schwall und Sunk noch bis zu 74,9 und 40,9 cm für $Q_{Rh} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ zu.

Zu diesen grossen Werten kommt bei grossen Abflussmengen des Rheins besonders im oberen Vorhafen eine Wasserspiegelschwingung hinzu, die nicht von den Schwallvorgängen, sondern von Ablösungserscheinungen an der Einfahrt zum Hafen hervorgerufen wird. Ihr werden als Grundschwingung die Wasserspiegelerhöhungen durch den Schwall und die durch die Reflexion des Schwalls hervorgerufene Schwallschwingung überlagert. Grundschwingung und Schwallschwingung besitzen gleiche Frequenz, so dass die resultierende Schwingung harmonisch und ohne erhebliche Dämpfung verläuft.

Die genannten Grösstwerte für Schwall und Sunk lassen sich nur vermindern, wenn die Unterschütze, die bei gewöhnlichem Wehrbetrieb erst bei Rheinwassermengen über $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ gezogen werden, schon früher angehoben werden. Die Versuche haben ergeben, dass das Heben der Unterschütze schon bei $Q_{Rh} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Dämpfung der Schwalle vorteilhaft, zwischen 1800 und $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ jedoch erforderlich ist. Um bei $Q_{Rh} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ die gewöhnliche Wehrwassermenge von $2500-1170$ (Turbinenmenge) = $1370 \text{ m}^3/\text{s}$ abzuleiten, sind die fünf Unterschütze zu ziehen. Die Oberschütze bleiben in Staustellung und können beim Ausfall der Turbinen über den gehobenen Unterschützen um $3,70 - 1,10 = 2,60 \text{ m}$ schnell gesenkt werden. Dadurch lassen sich die Schwallhöhen im Messpunkt 5 auf 42,1 cm (Linie 4, Bild 5), die Sunktiefen im Messpunkt 29 auf 12,5 cm vermindern.

5. Schwall- und Sunkhöhen in der Schleusenammer

Die grossen Schwallhöhen am Obertor der Schleuse führten zur Frage nach der Höhe und der Wirkung der Schwallwelle in der Kammer bei geöffnetem Obertor. Am Messpunkt 22 in der Nähe des geschlossenen Untertores (Bild 1) wurde für den extremen Fall des Hochwassers mit $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 $3,6 \text{ t} = \frac{1}{555}$ 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 $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht mehr von der Höhe im oberen Vorhafen (Messpunkt 5) verschieden. Werden die Wehrverschlüsse dem Linienzug 4 von Bild 5 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, ob bei geöffnetem Untertor die Sunktiefen am Obertor (Messpunkt 31, Bild 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 4 auf Bild 5 werden aber auch die Sunktiefen in der Kammer vom Unterwasser her in Grenzen gehalten, die die Schifffahrt nicht stören.

6. Bewertung der Höhen von Schwall und Sunk

In den Bildern 1 und 5 sind stets die Spitzenwerte der Schwalle und Sunke als kennzeichnende Werte eingetragen, auch wenn sie nur kurzzeitig auftreten. Dieses Verfahren macht eine übersichtliche Darstellung in den Höhenschichtplänen und einfache Gegenüberstellungen und Vergleiche möglich. Für die Schifffahrt sind jedoch kurz auftretende Schwallspitzen weniger massgebend als die mittleren Höhen der Schwallrücken und mittleren Tiefen der Sunktäler. Nach den Aufzeichnungen der Schreibgeräte konnte das Verhältnis von Spitzenwerten zu Mittelwerten festgestellt werden. Es beträgt im oberen Vorhafen $1,26:1,00$, im unteren Vorhafen $1,38:1,00$. Dadurch werden beispielsweise bei $Q_{Rh} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ die Werte

von Bild 5 von 42,1 cm Schwallhöhe auf 33,4 cm und von 12,5 cm Sunktiefe auf 9,1 cm vermindert. Auch die Unterschiede der Schwall- und Sunkphasen sind bei den Mittelwerten wesentlich kleiner als bei den Spitzenwerten und können von der Schifffahrt nicht mehr als störend empfunden werden.

Die Verbesserungen für die Schifffahrt durch das Schnellsenken müssen noch nach der Häufigkeit der Abflussmengen beurteilt werden. Nach der Dauerlinie von Bild 5 treten die Wasserführungen über $1800 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ tritt im Mittel etwa an einem Tag des Jahres auf.

7. Wehrbetriebsplan

Beim gewöhnlichen Wehrbetrieb können die Wehrverschlüsse bis etwa $Q_{Rh} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ unabhängig von der Regelung beim Ausfall der Turbinen bedient werden. Die Oberschütze bleiben bis $Q_e = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ in Staustellung und werden bei zunehmenden Abflussmengen des Rheins gleichmässig auf die erforderliche Tiefe gesenkt. Bei $Q_{Rh} > 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ muss dagegen die Stauregelung im wesentlichen durch die Unterschütze erfolgen, damit die Oberschütze für das Schnellsenken in der Staustellung verbleiben können. Beim plötzlichen Ausfall von Maschinen wird für jede Turbine ein Oberschütz um das Mass gesenkt, das nunmehr zur Stauregelung erforderlich ist. Die zugehörige Schützstellung ergab sich aus den Versuchen.

Diese Regelung, die die *Wehrbedienung bei Hochwasser* nicht unbeträchtlich einengt, war für den ungünstigen Fall getroffen worden, dass alle vier Maschinen in Betrieb sind und gleichzeitig ausfallen. Laufen, wie es häufig ist, weniger als vier Maschinen, so beträgt die Ausfallwassermenge auch bei Vollwasser nicht $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, sondern 900, 600 oder $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Schwall- und Sunkhöhen sind dann, wie auch die Versuche zeigten, kleiner als bei vier ausfallenden Turbinen. Es war daher zu untersuchen, ob in diesen Fällen eine Erleichterung für den Wehrbetrieb statthaft ist. Diese Untersuchungen seien an einem Beispiel erläutert:

Bei vier Maschinen in Betrieb beträgt bei $Q_{Rh} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ die Turbinenwassermenge $1246 \text{ m}^3/\text{s}$ und die Wehrwassermenge $354 \text{ m}^3/\text{s}$. Die fünf Oberschütze sind beim gewöhnlichen Betrieb gleichmässig um 1,39 m unter Stauziel abgesenkt. Beim Ausfall der vier Maschinen ergibt sich eine Leerlaufwassermenge von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und eine Ausfallwassermenge von $1146 \text{ m}^3/\text{s}$, für die die vier Schnellsenkschütze um weitere 2,22 m auf insgesamt 3,61 m unter Stauziel schnell zu senken sind. Da als Schnellsenkweg insgesamt 3,70 m zur Verfügung stehen, wird die Schnellsenkhöhe noch nicht voll in Anspruch genommen.

Bei zwei Maschinen im Betrieb und $Q_{Rh} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen: Turbinenwassermenge $623 \text{ m}^3/\text{s}$, Wehrwassermenge $977 \text{ m}^3/\text{s}$, Absenkung der fünf Oberschütze $2,52 \text{ m}$. Beim Ausfall der zwei Maschinen ergeben sich: Leerlaufwassermenge $50 \text{ m}^3/\text{s}$, Ausfallwassermenge $573 \text{ m}^3/\text{s}$, erforderlicher Schnellsenkweg $1,68 \text{ m}$, Absenktiefe insgesamt $4,20 \text{ m}$ unter Stauziel. Es fehlen also noch $4,20 - 3,70 = 0,50 \text{ m}$ am erforderlichen Senkmass. Um das Stauziel auch nach dem Ausfall der Maschinen zu halten, müssen die übrigen Oberschütze nachgesenkt werden. Einen Einfluss auf den ersten Schwall hat das Nachsenken nicht. Die Schwallhöhen sind in diesem Falle unerheblich.

Das Beispiel zeigt jedoch, dass auch beim Betrieb nur weniger Maschinen der Wehrbetrieb bei Hochwasser keine Erleichterung erfährt. Es wurde daher auf Grund der Modellversuche ein Wehrbetriebsplan ausgearbeitet, der für die häufigsten Betriebsfälle die zweckmässigen Stellungen der fünf Wehrverschlüsse beim gewöhnlichen Betrieb und beim Ausfall von Maschinen in der Ausgangs- und Endstellung anzeigt und ausserdem den Uebergang zum Abfluss durch die Unterschütze mit den erforderlichen Stellungen beider Schütze festlegt. Bild 6 zeigt einen der Betriebspläne als Beispiel. Bei diesem Betriebsfall sind nur vier der fünf Wehrverschlüsse betriebsbereit, zwei der vier Maschinen sind in Betrieb und fallen aus, wobei zwei der vier betriebsbereiten Oberschütze schnell gesenkt werden. Zweckmässig ist hier eine Betriebsform, bei der die Oberschütze ungleich bedient werden.

Die Linien 1, 1α , 1β bezeichnen die Stellungen der vier

