Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 76 (1984)
Heft: 10

Artikel: Schwall- und Sunkerscheinungen in einer Flussstauhaltung
Autor: Kühne, Anton
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941222

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

Schwall- und Sunkerscheinungen in einer Flussstauhaltung

Anton Kühne

Zusammenfassung

Die automatische Regulierung eines Flusskraftwerkes setzt voraus, dass das Abflussverhalten der Stauhaltung bekannt ist. Durch systematische Messungen und instationäre Berechnungen lassen sich die notwendigen Grundlagen bereitstellen. Ergebnisse aus einer Untersuchung für das Kraftwerk Rheinau geben einen Einblick in den Verlauf von möglichen Schwall- und Sunkwellen.

Résumé: Les changements du niveau dans une retenue fluviale

La régulation automatique d'une usine hydroélectrique à basse chute présuppose la connaissance des caractéristiques d'écoulement du bief. Les données de base nécessaires peuvent être acquises à partir de mesures systématiques et de calculs effectués en régime non permanent. Les résultats d'une étude pour l'aménagement de Rheinau apportent une information sur la propagation des intumescences positives et négatives susceptibles d'être engendrées.

Summary: Changes of water level in a river acting as reservoir

The automatic control of a river power station requires the knowledge of the hydraulic behaviour of the river acting as a reservoir. Appropriate data can be obtained by systematic measurements and unsteady flow computations. The results of a study for the Rheinau power plant provide good information regarding the propagation of possible surges.

Riassunto: Cambiamenti del livello in una ritenuta fluviale

La regulazione automatica di una centrale idroelettrica a bassa caduta necessita della conoscenza delle caratteristiche di deflusso dal bacino di carico. I fondamenti necessari possono essere acquisiti a partire da misure sistematiche e da calcoli a regime non stazionario. I risultati presentati, frutto di una ricerca per la centrale di Rheinau, forniscono informazioni sul comportamento delle intumescenze possibili.

1. Einleitung

Die Erfahrung zeigt, dass sich in offenen Gerinnen der Wasserspiegel aufgrund von natürlichen Einflüssen, beispielsweise als Folge von Niederschlägen, Schneeschmelze usw., verhältnismässig langsam ändert. Die entsprechenden Veränderungen sind in der Natur meistens erst nach einer Dauer von mehreren Stunden oder gar Tagen optisch wahrnehmbar. Hingegen können durch künstliche Eingriffe ins Abflussregime rasche oder gar plötzliche Wasserstandschwankungen hervorgerufen werden. Dies gilt für jene Bereiche, wo der Durchfluss durch technische Installationen kontrolliert wird.

Wenn an irgendeiner Stelle im Gerinne der Durchfluss unvermittelt stark geändert wird, führt dies zu einem Anheben bzw. Absenken des Wasserspiegels, das heisst zu einer sogenannten Schwall- bzw. Sunkwelle. Diese Erscheinung tritt beispielsweise in einem gestauten Fluss auf, wenn der Abfluss durch die Turbinen oder über das Wehr plötzlich stark gedrosselt wird. In diesem Fall kommt es zu einem Auflaufen des Wassers oberhalb der Sperrstelle; es entsteht ein Schwall. Dieser bewegt sich als Oberflächenwelle flussaufwärts. Dem oberwasserseitigen Anheben steht ein unterwasserseitiges Absinken des Wasserspiegels – ein Sunk – gegenüber (Bild 1). Eine ausführliche Beschreibung dieser Phänomene findet der Leser in der Fachliteratur, zum Beispiel in [1], S. 400 ff.

Je nach Standpunkt und Interessenlage sind Schwall- und Sunkwellen als nützliche oder schädliche Phänomene zu beurteilen. In einer Flussstauhaltung, für die die Konzessionsvorschriften an gewissen Stellen ein konstantes Stauziel vorschreiben, sind Schwall- und Sunkwellen nicht erwünscht. Andererseits können in einer Kraftwerkskette, die nicht an konstante Wasserstände gebunden ist, Schwall- und Sunkwellenbewegungen zugunsten der Energieproduktion gesteuert werden. Bekanntlich lassen sich durch den sogenannten Schwell- und Kippbetrieb wirtschaftliche Vorteile erzielen, indem die zur Verfügung stehende Wassermenge primär zur Erzeugung von höherwertiger Energie genutzt wird.

2. Regulierung von Stauhaltungen

2.1 Stauregulierung und Abflussregulierung

Für die heute in Betrieb stehenden Niederdruckwerke an den grösseren Schweizer Flüssen gelten durchwegs recht enge Vorschriften in bezug auf den Wasserstand. Meistenorts sind nur kleine Schwankungen um das vorgeschriebene konstante Stauziel toleriert. Schwell- und Kippbetrieb ist unter diesen Voraussetzungen nicht möglich.

Damit der vorgeschriebene Wasserstand eingehalten werden kann, muss der Abfluss kontrolliert und angepasst werden. Dies ist die Aufgabe der sogenannten *Stauregulierung* beim Kraftwerk. Diese soll insbesondere in der Lage sein, bei plötzlich auftretenden Störungen möglichen Schwall- oder Sunkwellen vorzubeugen. Das Gegenstück zur Stauregulierung ist die sogenannte *Abflussregulierung*. Bei letzterer wird der Abfluss aus dem Stauraum direkt nach dem Zufluss oder nach einem vorgeschriebenen Programm, unabhängig vom Wasserstand in der Stauhaltung, eingestellt.

2.2 Automatisierung der Regulierung

Verschiedene Kraftwerke haben im Laufe der letzten Jahre die Regulierung automatisiert. Ausschlaggebend waren dabei betriebswirtschaftliche Gründe sowie Schwierigkeiten bei der Rekrutierung des für eine manuelle Regulierung notwendigen Personals. Die Installation einer funktionstüchtigen Regulierautomatik setzt voraus, dass das instationäre Abflussverhalten einer Stauhaltung bekannt ist. Die hierzu notwendigen Unterlagen sind durch systematische Messungen und Rechnungen zu beschaffen. Erste Aufschlüsse über die Abfluss-Charakteristik des Stauraums können mit analytischen Methoden gefunden werden [2, 3]. Wenn aber der detaillierte zeitliche und örtliche Verlauf einzelner Abflussereignisse interessiert, drängen sich numerische Simulationen mit einem instationären Berechnungsverfahren auf. Im folgenden wird eine Reihe entsprechender Berechnungen vorgestellt, die für das Kraftwerk Rheinau durchgeführt wurden. Die Resultate geben einen grundsätzlichen Einblick in den Verlauf von Schwall- und Sunkwellen anhand eines konkreten Beispiels aus der Praxis.

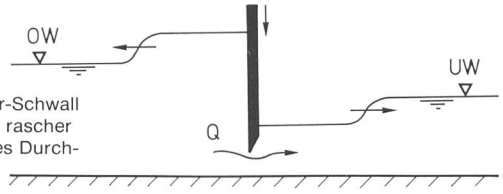

Bild 1. Absperr-Schwall und -Sunk bei rascher Drosselung des Durchflusses *Q*.

2.3 Das Kraftwerk Rheinau
Beschreibung der Anlagen

Das Kraftwerk Rheinau ist das zweitoberste von insgesamt 12 Laufwerken am Hochrhein. Eigentümerin des Werks ist die Elektrizitätswerk Rheinau AG, mit Sitz in Rheinau. Die Konzessionsstrecke beginnt im Rheinfallbecken, rund 3 km südwestlich von Schaffhausen. Das Stauwehr und das Maschinenhaus des Kraftwerks befinden sich rund 6,6 km vom Rheinfall entfernt, am Anfang der Rheinschleife um das Dorf Rheinau (Bild 2). An dieser Stelle kommen sich der Anfang und das Ende einer 4,5 km langen Flussschleife auf 400 m nahe. Die gesamte Konzessionsstrecke ist rund 12 km lang. Sie endet bei Balm. Das Gefälle beträgt 10,6 m; davon entfallen 4,85 m auf die Rheinschleife. Das gesamte Gefälle wird beim Maschinenhaus am Beginn der Schleife konzentriert (Bild 3). Hier wird der Oberwasserspiegel durch das Stauwehr um rund 6 m gehoben. Zudem wird das Gefälle der Schleife durch zwei Stollen abgeschnitten und ebenfalls für die Energieproduktion genutzt.

Die mittlere Jahresabflussmenge des Rheins beträgt bei Rheinau 373 m^3/s. Die Kraftwerkanlagen sind für ein grösstes Hochwasser von 1250 m^3/s dimensioniert. Die beiden Maschinengruppen können bis 400 m^3/s verarbeiten. Für die Rheinschleife ist ein Mindestabfluss von 5 m^3/s vorgeschrieben. Durch zwei Hilfswehre in der Schleife wird das Wasser so aufgestaut, dass die mittleren Wasserstände und somit das Landschaftsbild vor dem Bau des Kraftwerks rund um die Halbinsel Rheinau erhalten bleiben (Bild 4).

Automatisierung der Regelanlagen am Kraftwerk Rheinau

Die Regulierung am Kraftwerk Rheinau ist grundsätzlich darauf ausgerichtet, den Pegelstand des Rheins am Fusse des Rheinfalls konstant auf der Kote 359,00 m ü. M. zu halten. Den variablen Abflussmengen des Rheins und dem Fliessgefälle entsprechend muss der Oberwasserstand beim Stauwehr zwischen den Koten 358,95 (bei Niederwasser, 105 m^3/s) und 357,70 (640 m^3/s) reguliert werden, um das Stauziel im Rheinfallbecken zu erfüllen. Bei Wassermengen über 640 m^3/s wird der natürliche Wasserspiegel im Rheinfallbecken nicht mehr beeinflusst (Bild 5). Die Regulierung der Stauwehre im Kraftwerk Rheinau ist ausführlich in [4] beschrieben.

Im Zuge fälliger Renovationen entschloss sich die Elektrizitätswerk Rheinau AG zu einer Erneuerung und Automatisierung der Wasserstands- und Wehrregelanlage. Die Auslegung der automatischen Regelung erfordert detaillierte Kenntnisse über die hydraulischen Verhältnisse längs der Konzessionsstrecke. Um die entsprechenden Grundlagen zu beschaffen, wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Diese umfassten unter anderem:

- Messungen und Berechnungen von Wasserspiegellagen bei stationären Verhältnissen,
- Schwall- und Sunkversuche mit Pegelstandmessungen,
- numerische Simulation von Schwall- und Sunkbewegungen als Folge von verschiedenen Betriebsstörungen.

Die Untersuchungen zu den stationären Verhältnissen sowie drei praktische Schwall- und Sunkversuche, verbunden mit Pegelstandmessungen längs der interessierenden Flussstrecke, wurden von Fachleuten der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) durchgeführt. Mit der Berechnung von instationären Abflussvorgängen wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich beauftragt.

3. Schwall- und Sunkversuche im Rhein

Am 24. August 1982 führte die NOK drei Versuche zur Beobachtung von Schwall- und Sunkbewegungen im Bereich

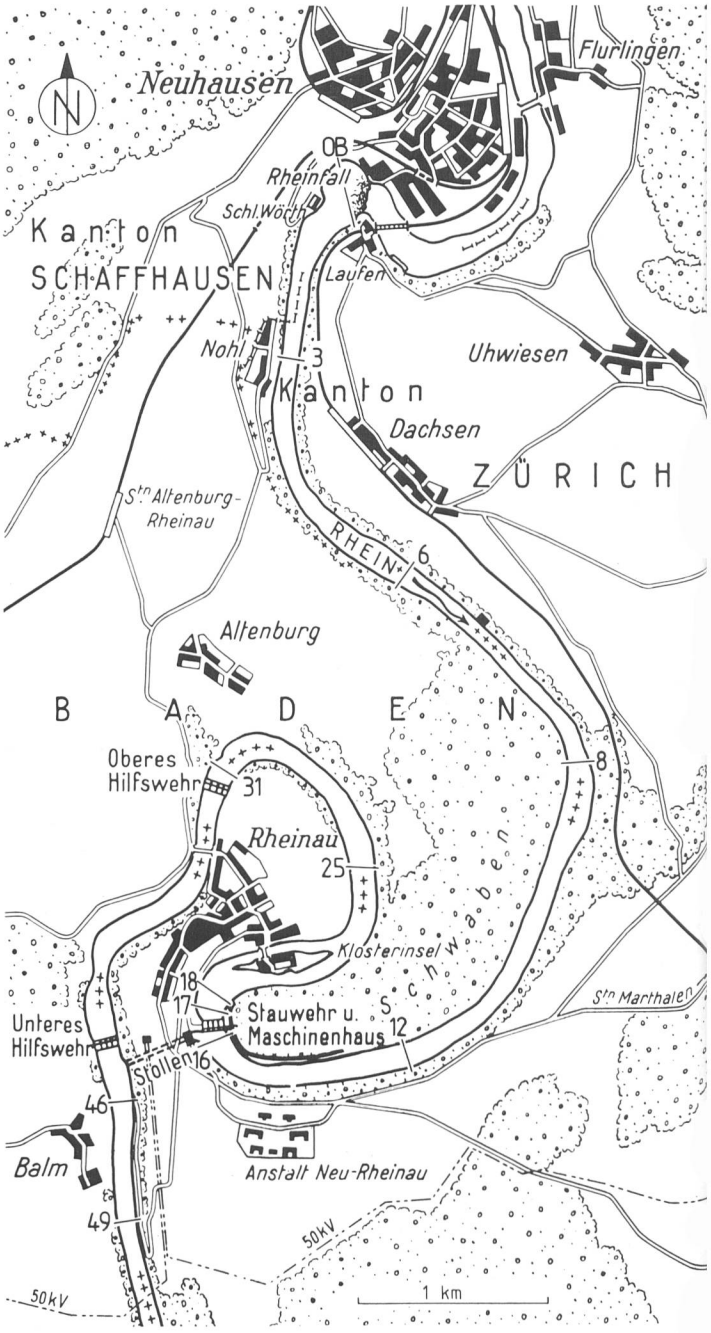

Bild 2. Übersichtsplan zur Staustufe Rheinau.

Bild 3. Stauwehr und Maschinenhaus des Kraftwerks Rheinau.

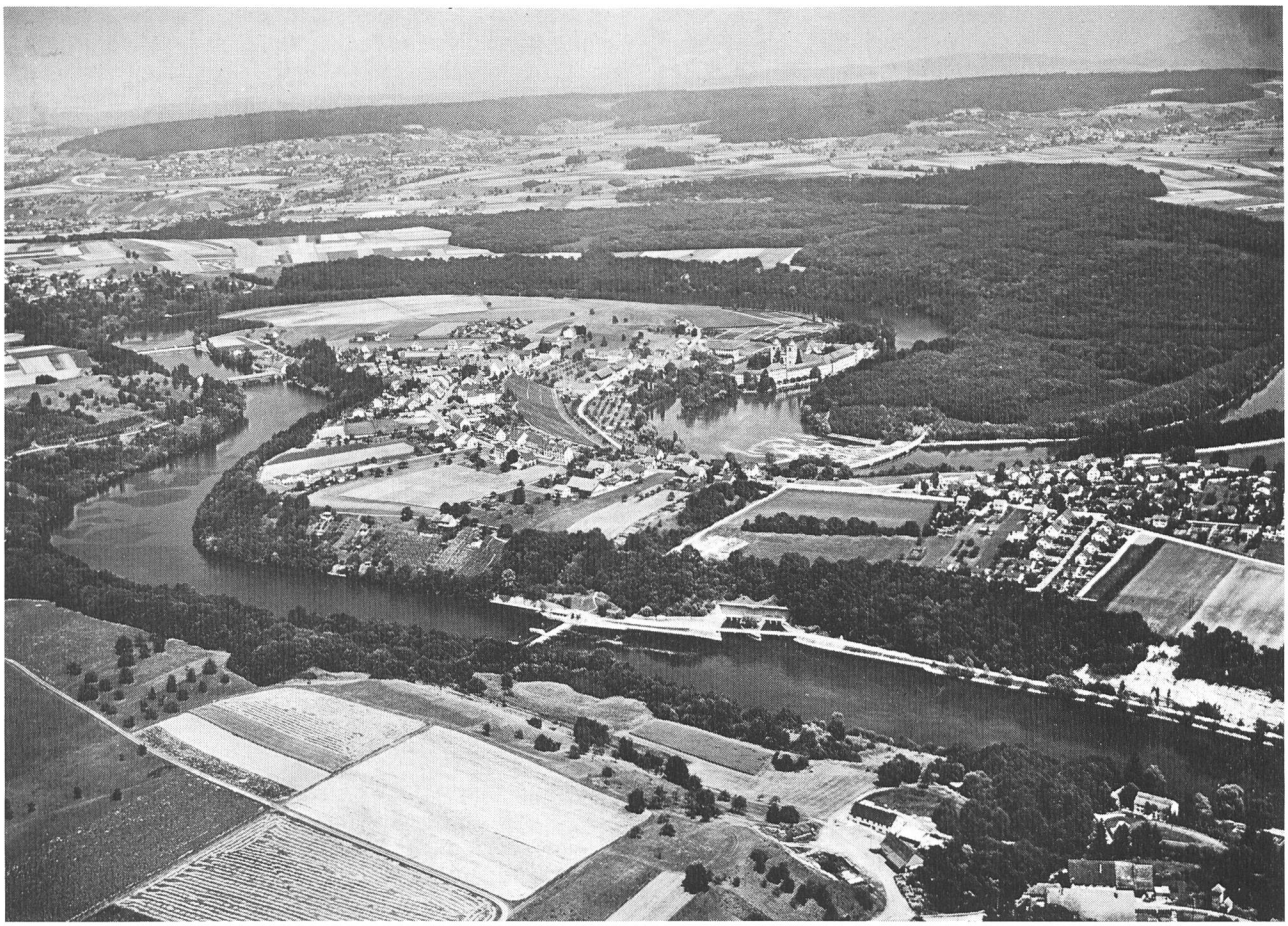

Bild 4. Blick in Richtung Nord-Osten über Rheinschleife und Halbinsel Rheinau. Deutlich erkennbar sind das Stauwehr, das ehemalige Kloster Rheinau, das obere Hilfswehr, das untere Hilfswehr und der Stollenauslauf unterhalb des unteren Hilfswehrs (vgl. Bild 2).

des Kraftwerks Rheinau durch. Natürlich konnten die Betriebsbedingungen, im speziellen der Turbinendurchfluss bei den Kraftwerken Schaffhausen und Rheinau, nicht beliebig geändert werden, denn weder die Energieproduktion noch die Interessen der Rheinanstösser durften erheblich beeinträchtigt werden. Zur Zeit der Versuche führte der Rhein bei Schaffhausen eine Wassermenge von 450 m^3/s, also etwa 20% mehr als die mittlere Jahresabflussmenge. Beim Versuch Nr. 1 erhöhte das Kraftwerk Schaffhausen die turbinierte Abflussmenge während rund 10 Minuten um 25 m^3/s. Die daraus resultierende Schwallwelle wurde im Stauraum des Kraftwerks Rheinau an 5 Stellen gemessen. Die Wehre der Anlage Rheinau blieben dabei blockiert.

Der Versuch Nr. 2 wurde am Kraftwerk Rheinau durchgeführt. Hier wurde der Turbinendurchfluss während 10 Minuten um 100 m^3/s reduziert (Bild 6). Die Beobachtungen konzentrierten sich auf den Schwall im Stauraum und den Sunk im Unterwasser, unterhalb des Stollenauslaufes. Das Hauptwehr wurde um 20 cm gehoben, damit die Schwallwelle dort nicht überschwappen konnte. Die Hilfswehre blieben blockiert. Die gemessene Schwallwelle im Stauraum ist auszugsweise in Bild 7 wiedergegeben.

Der Versuch Nr. 3 sollte Aufschluss über die Ausbreitung einer Schwallwelle zwischen dem Hauptwehr und dem unteren Hilfswehr geben. Zu diesem Zweck wurde das Hauptwehr so abgesenkt, dass der Abfluss in die Rheinschleife um rund 50 m^3/s anstieg. Die Hilfswehre blieben blockiert.

Bei diesen Schwall- und Sunkversuchen konnte rein optisch im Fluss kaum eine Wasserspiegelveränderung wahrgenommen werden. Diese liess sich nur anhand der kontinuierlich abgelesenen Messwerte eindeutig feststellen.

4. Berechnung von Schwall- und Sunkwellen

Unter gewissen vereinfachenden Annahmen lassen sich Näherungsformeln für die Berechnung der Schwallgeschwindigkeit und der Schwallhöhe herleiten, siehe [1]. Grundsätzlich sind aber Schwall- und Sunkbewegungen instationäre Vorgänge. Diese Tatsache gilt es zu beachten, wenn es darum geht, den detaillierten Ablauf einzelner Schwall- und Sunkwellen in natürlichen Gerinnen rechnerisch zu erfassen. Die Lösung dieser Aufgabe erheischt dementsprechend geeignete Rechenverfahren.

4.1 Rechenmodell

Im folgenden werden Ergebnisse von berechneten Schwall- und Sunkwellen in der Stauhaltung Rheinau gezeigt. Diese Rechnungen wurden mit einem an der VAW entwickelten Computerprogramm «Floris» durchgeführt. Letzteres ist auf die Berechnung instationärer Abflüsse in Systemen von Bächen und Flüssen ausgerichtet. Das Programm basiert auf den bekannten Differentialgleichungen von *de Saint-Venant.* Diese Gleichungen seien hier in der folgenden Form wiedergegeben.

– *Kontinuitätsgleichung*

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \qquad (1)$$

– *Impulsgleichung*

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + g\,A\,\frac{\partial z}{\partial x} + g\,A S_f = 0 \qquad (2)$$

Die einzelnen Bezeichnungen haben die folgende Bedeutung:

t	[s]	Zeit,
x	[m]	Ortsvariable (in Fliessrichtung),

z	[mü.M.]	Wasserspiegel-Kote,
Q	[m³/s]	Abfluss,
q	[m³/s/m]	seitlicher Zufluss pro Flusslaufmeter,
A	[m²]	Durchströmte Gerinne-Querschnittsfläche bis zur Höhe des Wasserspiegels,
B	[m]	Breite des Gerinnes an der Wasseroberfläche,
S_f	[–]	Reibungsgefälle,
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung.

Für das Reibungsgefälle wird das Reibungsgesetz von Manning-Strickler verwendet:

$$S_f = \frac{Q|Q|}{k^2 A^2 R^{4/3}} \qquad (3)$$

Dabei bezeichnen

R	[m]	den hydraulischen Radius und
k	[m$^{1/3}$/s]	den Reibungsbeiwert.

Die unabhängigen Variablen in den hier vorliegenden Differentialgleichungen sind t (Zeit) und x (Ort); die abhängigen (gesuchten) Grössen sind Q (Abfluss) und z (Wasserstand). Im Computerprogramm «Floris» werden die de Saint-Venant'schen Gleichungen mit einem impliziten Differenzenverfahren numerisch integriert.

4.2 Nachrechnung von gemessenen Ereignissen

Damit die de Saint-Venant'schen Gleichungen mit dem impliziten Differenzenverfahren gelöst werden können, ist die Berechnungsstrecke in eine geeignete Anzahl von – nicht notwendigerweise gleich langen – Abschnitten zu unterteilen. Die entsprechenden Abschnittsgrenzen sind so zu legen, dass dort die Geometrie des Gerinnequerschnittes bekannt ist. In den vorliegenden Untersuchungen wurde die gesamte 12 km lange Konzessionsstrecke durch 72 Querprofile in 71 Abschnitte unterteilt. Die notwendigen Längen- und Querprofildaten wurden von der NOK bereitgestellt. Aufgrund von diversen stationären Staukurvenberechnungen und Vergleich mit gemessenen Spiegellagen hatte die NOK für die interessierende Flussstrecke zutreffende k-Werte ermittelt. Die hier beschriebenen instationären Berechnungen beruhen auf den gleichen k-Werten. In der Stauhaltung zwischen dem Rheinfall und dem Stauwehr des Kraftwerks Rheinau liegen diese Werte zwischen 35,0 und 38,0 m$^{1/3}$/s.

Bedingt durch verschiedene Flussbauwerke und natürliche Randbedingungen wurde die gesamte Berechnungsstrecke in mehrere Teilstrecken aufgeteilt. In den einzelnen Übergangsstellen wurden die Gleichungen (1) und (2) durch hydraulische Beziehungen ersetzt, die dem lokalen Abflussgeschehen Rechnung tragen. Es betrifft dies den Abfluss über das Stauwehr, die Verzweigung bzw. den Zusammenfluss oberhalb und unterhalb der Kloster-Insel Rheinau, die Abflüsse über das obere und das untere Hilfswehr.

Im Rahmen der Modell-Eichung wurden mehrere stationäre und instationäre Ereignisse nachgerechnet und mit den vorhandenen Messresultaten verglichen. In Bild 7 ist der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen des Schwall- und Sunkversuchs Nr. 2 der NOK vom 24. August 1982 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Reduktion des Turbinendurchflusses beim Kraftwerk Rheinau um 100 m³/s im Stauraum einen etwa 12 cm hohen Schwall bewirkt. Dieser pflanzt sich mit einer Geschwindigkeit von rund 5,5 m/s im Oberwasser flussaufwärts fort. Der Wellenberg durchläuft die Stauhaltung in rund 20 Minuten.

4.3. Simulation einiger ausgewählter Betriebsfälle

Wie erwähnt, ist das Kraftwerk Rheinau mit zwei Turbinen ausgerüstet, die zusammen bis 400 m³/s verarbeiten können. Würde der Fall eintreten, dass eine oder gar beide dieser Turbinen kurzfristig ausfielen, wäre wohl mit einem mar-

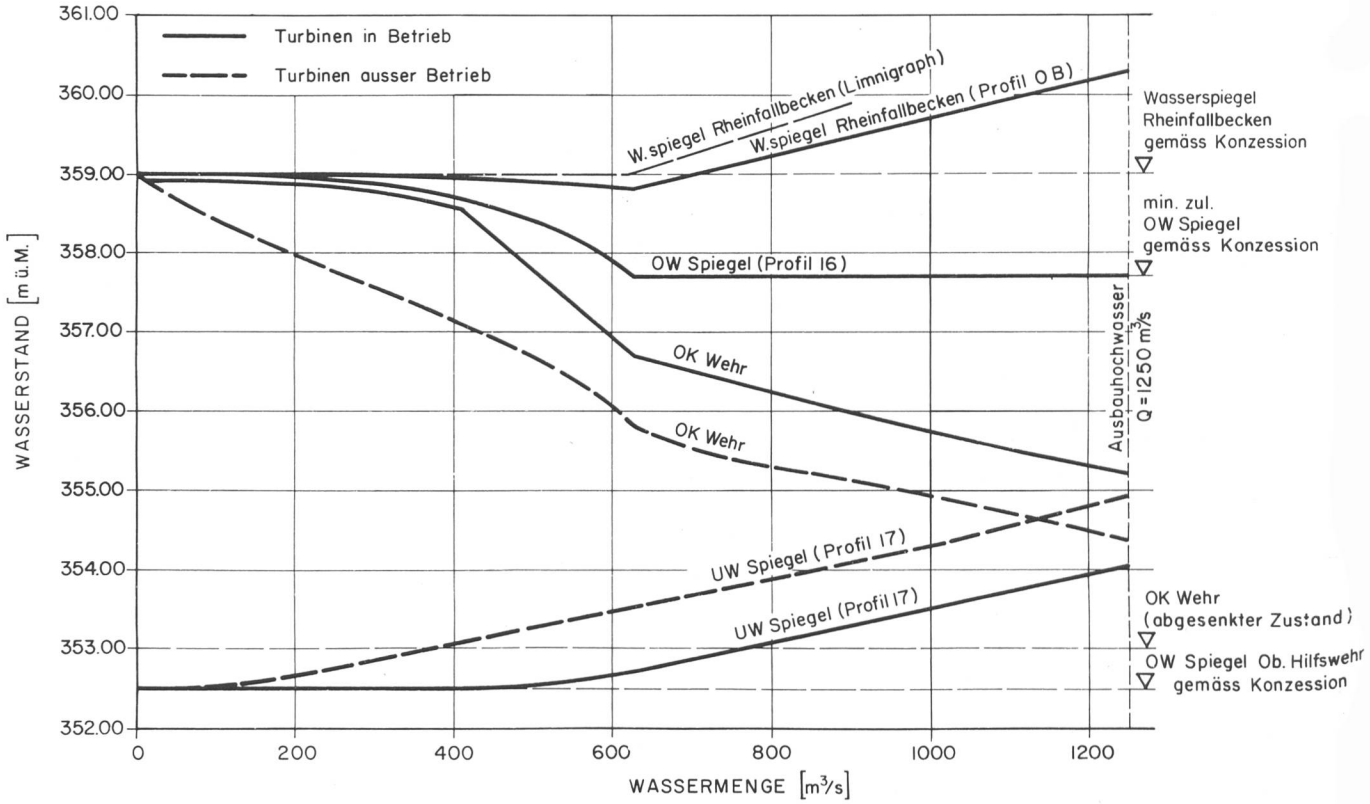

Bild 5. Regulierreglement für das Stauwehr beim Kraftwerk Rheinau (die Profilangaben beziehen sich auf Bild 2).

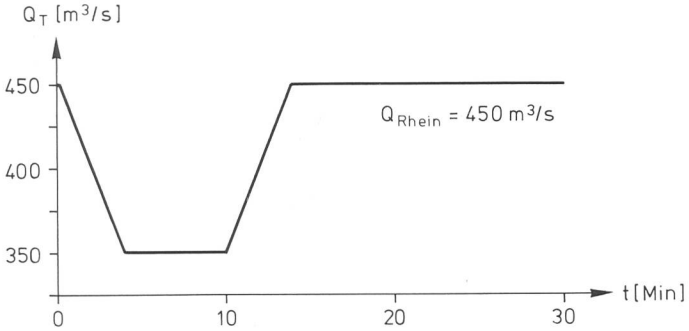

Bild 6. Änderung des Turbinendurchflusses Q_T im Kraftwerk Rheinau beim Schwall- und Sunkversuch Nr. 2 der NOK vom 24.8.1982.

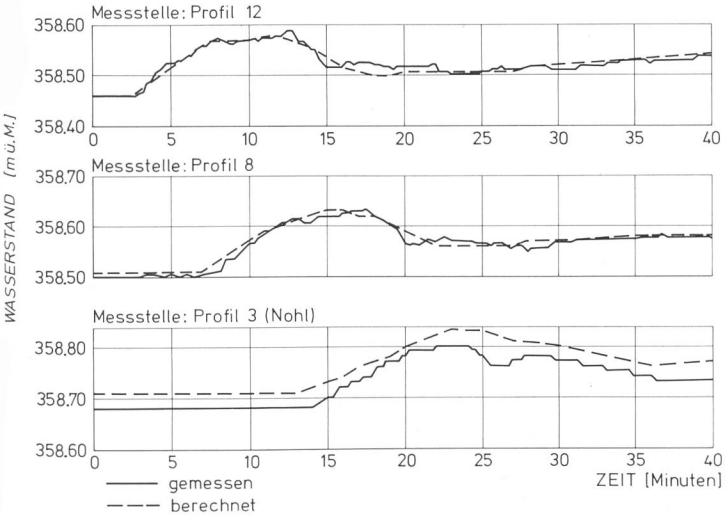

Bild 7. Vergleich zwischen Messung (——) und Rechnung (– – – –) für den Schwall- und Sunkversuch Nr. 2 der NOK vom 24.8.1982 (vgl. Bild 6).

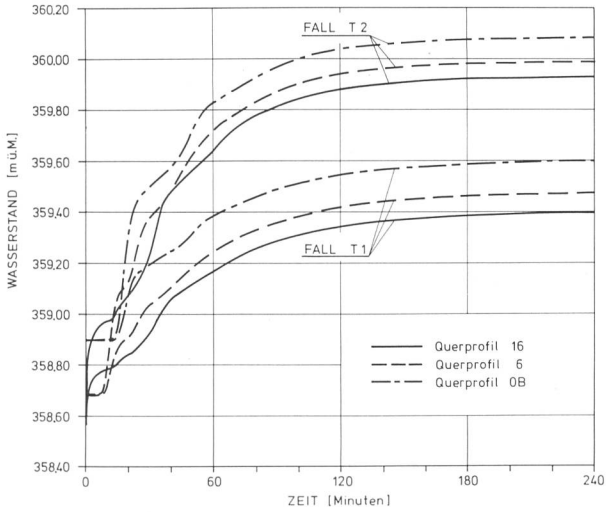

Bild 8. Ansteigen des Wasserspiegels in der Stauhaltung Rheinau bei Ausfall einer Turbine (Fall T1) bzw. beider Turbinen (Fall T2). Die Rechnung beruht auf einer Wasserführung von Q_{Rhein} = 405 m³/s.

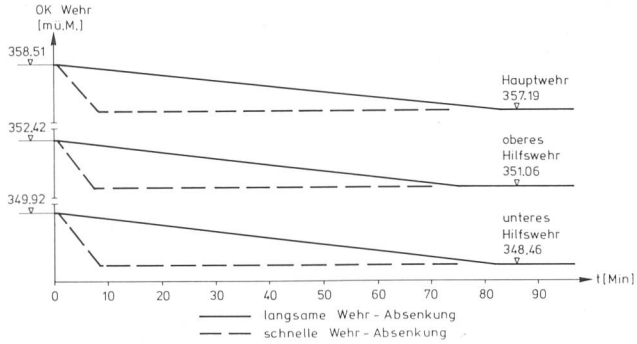

Bild 9. Zeitlicher Verlauf der Wehrabsenkungen.

kanten Schwall im Oberwasser zu rechnen. Welche Wellenbewegungen wären im einzelnen zu erwarten? Um Anhaltspunkte darüber zu erhalten, wurde mit dem Computerprogramm «Floris» eine Reihe von ausgewählten Betriebsfällen numerisch simuliert. Die Ergebnisse geben Aufschluss über den zeitlichen und örtlichen Verlauf der entsprechenden Schwallwellen. Anhand dieser Resultate kann das instationäre Verhalten des Stauraums analysiert werden. Diese Analyse ihrerseits liefert die Grundlagen für die Automatisierung der Wasserstands- und Wehrregelanlage beim Kraftwerk. Im folgenden werden einige Beispiele von simulierten Betriebsfällen vorgestellt.

Turbinenausfall bei blockierten Wehren

Es wird eine Wasserführung von $Q = 405$ m³/s im Rhein angenommen. Beim Kraftwerk Rheinau werden davon 400 m³/s durch die Maschinen verarbeitet, während eine vorgeschriebene Mindestmenge von 5 m³/s über das Stauwehr und somit durch die Rheinschleife abfliesst. Zum Zeitpunkt $t = 0$ trete eine Betriebsstörung auf. Dabei werde der Turbinendurchfluss wie folgt gedrosselt:

Fall T1:
Reduktion von $Q = 400$ m³/s auf $Q = 200$ m³/s innert 10 s (Ausfall einer Turbine).

Fall T2:
Reduktion von $Q = 400$ m³/s auf $Q = 0$ m³/s innert 10 s (Ausfall beider Turbinen).

Die Wehre seien blockiert, und zwar auf folgenden Höhen:

OK Hauptwehr	358,51 m ü. M.
OK oberes Hilfswehr	352,42 m ü. M.
Ok unteres Hilfswehr	349,92 m ü. M.

Im folgenden werden nur die Auswirkungen in der Stauhaltung zwischen Hauptwehr und Rheinfall betrachtet. Die Rechenergebnisse zeigen, dass die beiden supponierten Betriebsstörungen ein deutliches Anheben des Wasserstandes in der ganzen Stauhaltung bewirken. Da die Wehre blockiert sind, nimmt in jedem Querprofil der Wasserstand monoton zu bis zu einem bestimmten Maximalwert. Nach rund 4 Stunden ist dieser überall erreicht. Im Fall T1 liegt der maximale Wasserstand für alle Querprofile 70 bis 75 cm über dem Ausgangswasserstand. Im Fall T2 beträgt die entsprechende Abweichung 120 bis 140 cm. Die Reaktion der Stauhaltung auf die beiden Betriebsfälle wird durch Bild 8 verdeutlicht. Dort ist der zeitliche Verlauf der berechneten Wasserstandsänderung für drei Flussstellen festgehalten. Deren örtliche Lage ist aus Bild 2 ersichtlich.

Abminderung der Schwallwellen durch Wehrregulierung

In bezug auf die Wasserführung des Rheins gelte die gleiche Ausgangslage wie im vorhergehenden Abschnitt. Es wird folgende Betriebsstörung angenommen:
Reduktion des Turbinendurchflusses von $Q = 400$ m³/s auf $Q = 0$ m³/s (Ausfall beider Turbinen) innert 10 s.

Der Abflussdrosselung bei den Turbinen soll mit einer Absenkung der Wehre entgegengesteuert werden. Dabei interessiert, wie sich einerseits eine schnelle Wehrabsenkung (Fall T/W1) und andererseits eine langsame (Fall T/W2) auswirkt. Der zeitliche Verlauf der entsprechenden Wehrabsenkungen ist in Bild 9 skizziert.

Die resultierenden Wasserstandschwankungen in der Stauhaltung sind wieder am Beispiel von 3 Querprofilen aufgezeichnet (Bild 10). Demnach bewirken die Betriebsstörungen im Oberwasser zwar eine Schwallwelle; diese wird aber von einer Sunkwelle, hervorgerufen durch die Wehrabsenkung, «verfolgt» und dementsprechend gestört. Dank der Wehrabsenkung pendeln die Wasserstände wieder zurück. Überdies sind die Höchst-Wasserstände wesentlich tiefer als im Fall T2 (Bild 8). Die schnelle Wehrab-

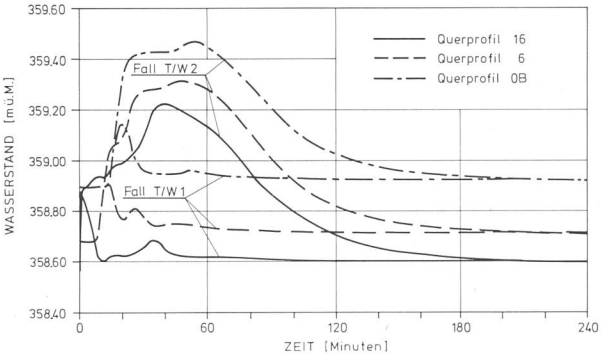

Bild 10. Der Schwall in der Stauhaltung Rheinau infolge Ausfall beider Turbinen kann durch eine geeignete Wehrabsenkung stark reduziert werden. Fall T/W1: rasche Absenkung; Fall T/W2: langsame Absenkung.

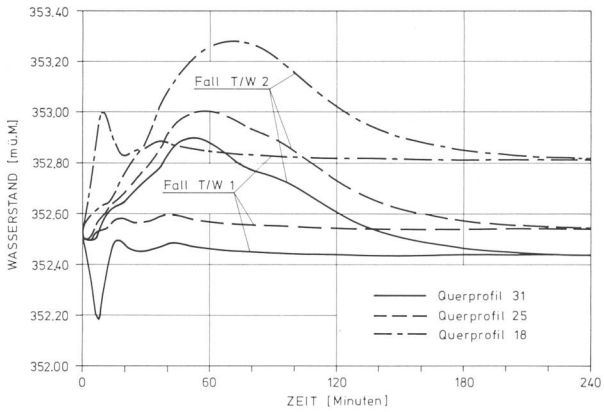

Bild 11. Bei gleichzeitiger Absenkung des Stauwehrs und des oberen Hilfswehrs überlagern sich in der Zwischenstauhaltung eine Schwallwelle von oben und eine Sunkwelle von unten, besonders deutlich bei rascher Absenkung (Fall T/W1).

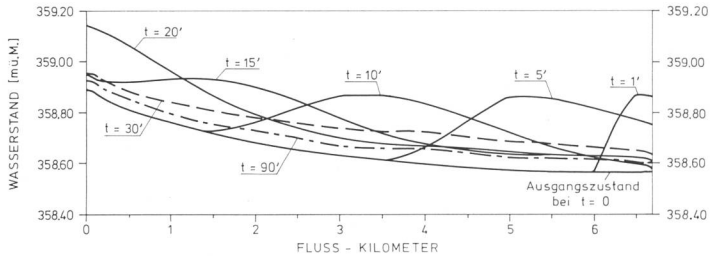

Bild 12. Fortpflanzung einer Schwallwelle im Stauraum Rheinau, dargestellt anhand von berechneten Wasserspiegellagen für verschiedene Zeitpunkte. Mittlere Schwallgeschwindigkeit gegenüber den Ufern: 5,5 m/s. km 0 entspricht dem Querprofil OB, km 6,6 dem Querprofil 16 (Bild 2). Ausgangslage: Q_{Rhein} = 405 m³/s.

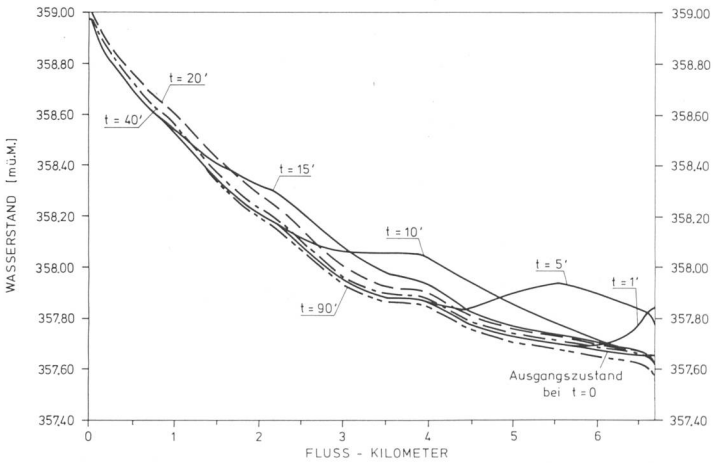

Bild 13. Fortpflanzung und Dämpfung einer Schwallwelle bei Hochwasser (Q_{Rhein} = 700 m³/s). Mittlere Schwallgeschwindigkeit gegenüber den Ufern: 4,7 m/s.

senkung reduziert die Schwallhöhen stärker als die langsame.

Einen interessanten Verlauf zeigen die Wasserspiegelschwankungen im Flussabschnitt zwischen dem Stauwehr und dem oberen Hilfswehr. In diesem Bereich wird der Wasserstand an den einzelnen Flussstellen einerseits von einer flussabwärts laufenden Schwallwelle (Absenkung des Hauptwehrs) und andererseits von einer flussaufwärts laufenden Sunkwelle (Absenkung des oberen Hilfswehrs) beeinflusst. Diese beiden gegenläufigen Phänomene wirken sich besonders im Fall der schnellen Wehrabsenkung deutlich aus. Bild 11 zeigt, dass sich im letztgenannten Falle im Querprofil 31, also unmittelbar oberhalb des oberen Hilfswehrs, vor allem der Sunk bemerkbar macht, während im Querprofil 18, also kurz nach dem Stauwehr, der Schwall überwiegt. Beim Querprofil 25, in der Mitte zwischen den beiden Wehren, verhält sich der Wasserspiegel praktisch ruhig.

Ein anschauliches Bild darüber, wie sich die Schwallwelle im Fall T/W1 in der Stauhaltung flussaufwärts bewegt, vermittelt Bild 12. Dort sind einige «Momentaufnahmen» der berechneten Wasserspiegellage längs der Flussstrecke festgehalten.

4.4 Schwallwellen bei Hochwasser

Die im vorangehenden Abschnitt gezeigten Schwallwellen basieren alle auf einer konstanten Wasserführung des Rheins von Q = 405 m³/s beim Rheinfall. Wie würden sich die entsprechenden Betriebsstörungen bei grösseren Zuflüssen auswirken? Das folgende Beispiel für ein Hochwasser von Q = 700 m³/s gibt hierüber näheren Aufschluss.

Im stationären Zustand gilt: je grösser der Durchfluss, desto grösser auch das Wasserspiegelgefälle längs der Flussachse in der Stauhaltung. Die steilere Wasserspiegellage führt dazu, dass vom Stauwehr ausgehende Schwallwellen flussaufwärts stark gedämpft werden. Dies ist am Beispiel einer Betriebsstörung gemäss Fall T/W1 in Bild 13 illustriert. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des Regulierreglementes des Kraftwerks Rheinau das Stauziel, bis zu einer Abflussmenge von etwa 640 m³/s (Bild 5), am oberen Ende der Stauhaltung liegt. Dementsprechend muss bei Hochwasser der Wasserstand beim Stauwehr gesenkt werden.

5. Folgerungen

Die Form von Schwall- und Sunkwellen hängt in einer Stauhaltung von verschiedenen Faktoren ab. Die Höhe und der zeitliche Verlauf dieser Wellen werden beeinflusst von der Art der Betriebsstörung und von der zugrunde gelegten Regulierung und von der Wasserführung des Flusses. Im weiteren spielen die Gerinnegeometrie, das Sohlengefälle und die Reibungsverhältnisse eine Rolle. Die hier gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf den Bereich des Kraftwerks Rheinau; sie lassen sich nicht in allen Einzelheiten auf andere Stauhaltungen mit ihren speziellen Voraussetzungen übertragen.

Mit Hilfe eines mathematischen Modells, das instationäre Abflussvorgänge in natürlichen Gerinnen erfassen kann, lassen sich Schwall- und Sunkvorgänge unter verschiedenen Voraussetzungen und Randbedingungen berechnen. Dies zeigen die vorangehenden Beispiele. Die Simulation einer Anzahl von repräsentativen Fällen erlaubt es, das instationäre Verhalten eines Stauraums zu analysieren.

Eine derartige Analyse ist aber eine Grundvoraussetzung, wenn es gilt, eine Stau- oder Abflussregulierung zu automatisieren. Eine automatische Regelung soll ja nicht nur den «normalen» Betriebsfall, sondern auch unerwartete Situationen, die bis heute vielleicht noch nicht beobachtet

wurden, bewältigen können. Diese Forderung kann nur dann erfüllt werden, wenn genügend Anhaltspunkte über den Ablauf der entsprechenden möglichen Vorgänge vorliegen. Ohne instationäre Berechnungen können die notwendigen Kenntnisse kaum erarbeitet werden. Die Berechnungen müssen der spezifischen Situation der jeweiligen Kraftwerksanlagen Rechnung tragen. Hiezu bedarf es einer mathematischen Beschreibung, die die natürlichen Abläufe möglichst detailliert nachzubilden vermag. Entsprechende Modelle bzw. im praktischen Einsatz erprobte Computerprogramme stehen heute zur Verfügung. Das im Rahmen dieser Studie eingesetzte Programm «Floris» ist ein Beispiel eines dieser modernen rechnerischen Hilfsmittel aus dem Bereich der Gerinnehydraulik.

Verdankung

Der Autor dankt der Elektrizitätswerk Rheinau AG dafür, dass er die unter Abschnitt 4 beschriebenen Rechenergebnisse hier veröffentlichen durfte. Ferner möchte er der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK), die die Bilder 2 bis 5 dieser Publikation zur Verfügung stellte, den besten Dank aussprechen.

Literatur

[1] *Press, H.* und *Schröder, R.:* Hydromechanik im Wasserbau. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, München, 1966.

[2] *Zielke, W.* und *Horn, H.:* Das dynamische Verhalten von Flussstauhaltungen. Bericht Nr. 29 der Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, 1974.

[3] *Kühne A.:* Flussstauregulierung; grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden. Mitteilung Nr. 13 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1975.

[4] *Elmiger, E.:* Automatische Regulieranlagen der Stauwehre im Kraftwerk Rheinau. «Bulletin des Elektrotechnischen Vereins», Bd. 53, Nr. 20, 1962.

Adresse des Verfassers: Dr. *Anton Kühne,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Das Donaukraftwerk Melk

Gunther Brux

Österreich deckt seinen Strombedarf etwa zur Hälfte durch Laufkraftwerke. Den grössten Anteil daran hat die Donau, die auf den 350 km zwischen Passau und Wolfsthal bei 155 m Gefälle zwölf Staustufen mit Laufkraftwerken erhalten soll (Tabelle 1). Im Bundesland Niederösterreich entstand 2 km stromaufwärts von Melk an der Donau das siebente österreichische Donaukraftwerk, dessen Hauptmaschinensätze seit 1982 Strom in das Verbundnetz liefern. Die Verwendung von Rohrturbinen ermöglicht eine landschaftsgerechte *Niedrigbauweise* (Bild 1) wie schon die Donaukraftwerke Ottenstein-Wilhering, Altenwörth und Abwinden-Asten.

Das Donaukraftwerk Melk entstand neben dem derzeitigen Stromverlauf in einer rund 138 ha grossen *Baugrube* (Bilder 2 und 3), die mit einem Umschliessungsdamm gegen Hochwasser geschützt war. Nach Fertigstellung des Bauwerks hat man den rund 4,2 km langen *Durchstich* geflutet, die Donau in ihr neues Bett und auch durch die Rohrturbinen umgeleitet (Bilder 4 und 5).

1. Stauziel und Wassermengen

An der Staustelle bei Strom-km 2037,96 im über 4 km langen Durchstich (Aushub: 13 Mio m^3) beträgt das *Stauziel* 214 m ü. A. mit Staumarke im Strom-km 2049,67 auf Höhe 214,35 m ü. A. Der Aufstau oder die *Nutzfallhöhe* beträgt 11,27 m bei RNW, 9,59 m bei MW und 4,41 m bei HSW mit *Eintiefung* des Unterwassers (Aushub: 2,3 Mio m^3 Kiesbaggerung).

Die *Ausbauwassermenge* beträgt 2700 m^3/s (50-Tage-Wasserführung) und die charakteristischen Wassermengen 867 m^3/s für RNW_{70}, 1807 m^3/s für MW_{70}, 4804 m^3/s für HSW_{70} und 11170 m^3/s für HW_{100}.

2. Kraftwerk und Stromerzeugung

Die Krafthalle (Bild 6, links) enthält neun Maschinensätze; jeder besteht aus einer Kaplanturbine (Rohrturbine mit vierblättrigem Laufrad von 6,30 m Durchmesser und bei Vollast mit 300 m^3/s Schluckvermögen; 21 MW) (Bild 7) und einem Drehstromgenerator (23 MVA). Das Regelarbeitsvermögen des Kraftwerks beträgt rund 1,2 Mrd. kWh (1180 GWh) – davon 43,3% im Winter (Oktober bis März) und 39,2% im Sommer (Mai bis August) –, die Engpassleistung 187 MW und die gesicherte Mindestleistung 78 MW.

Der elektrische Strom wird über ein unterirdisches 110-kV-Kabel an die Gemeinschafts-Schaltanlage Bergern (Verbundgesellschaft/NEWAG) geliefert und von dort in das 100-kV-Netz eingespeist. Mit Inbetriebnahme des Donaukraftwerks Melk erhöht sich das Regelarbeitsvermögen der Donaukraftwerke auf jährlich 9,6 Mrd. kWh.

3. Wehranlage

Die Wehranlage (Bild 6, Mitte) ist 186 m lang, hat 13 m Stauwandhöhe und umfasst sechs Wehrfelder von je 24 m lichter Weite – abgeschlossen mit Drucksegment mit aufgesetzter Stauklappe (Bild 8). Die Schwelle liegt auf 201,50 m ü. A. und das Stauziel auf 214 m ü. A.. Die Abflussmengen HG_{100} betragen 11170 m^3/s und RHHQ 14000 m^3/s.

4. Schleusenanlage

Die Schleusenanlage (Bild 6, rechts) hat zwei Schleusenkammern (Bild 9) mit je 230 m Nutzlänge, 24 m Breite und 16,35 m hohen Mauern. Die Kammern mit seitlicher Füllung und Entleerung aus bzw. in die Donau haben als Abschluss *Hubsenktore* am Oberhaupt und *Stemmtore* am Unterhaupt. Die Schleusen besitzen Schiffsstossschutzeinrichtungen. Sie dienen bei grossen Hochwässern auch der *Hochwasserabfuhr.* An die Schleusenanlage schliessen im Ober- und Unterwasser *Vorhäfen* an (Bilder 6 und 10).
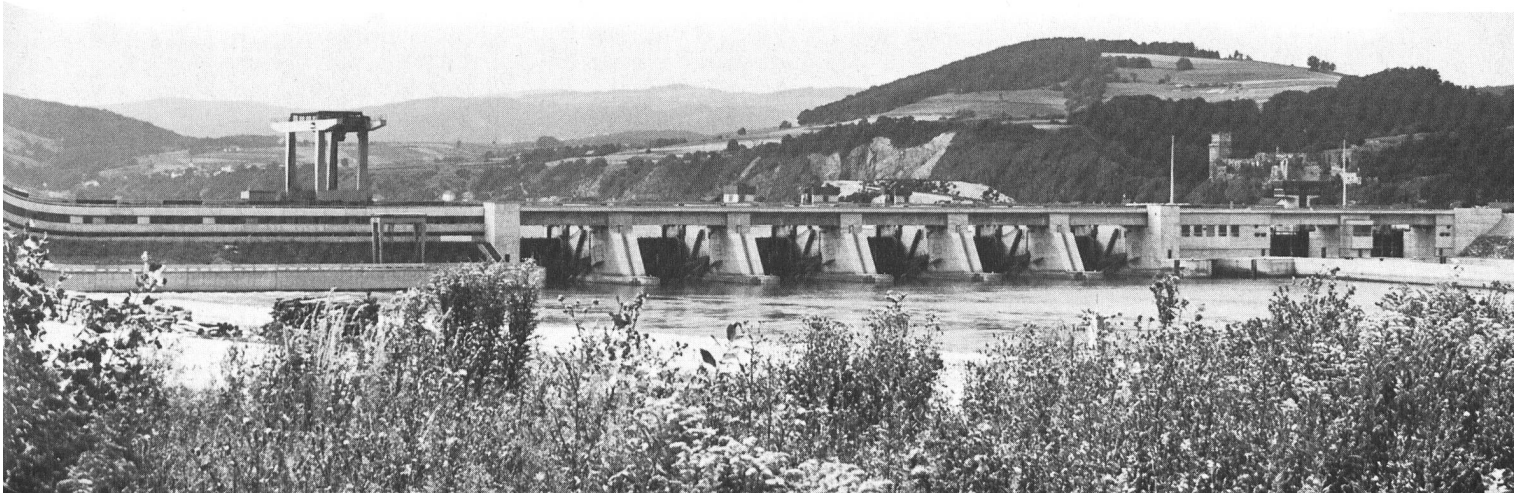
Bild 1. Blick auf das Donaukraftwerk Melk vom Unterwasser (rechtes Donauufer) aus. Die Verwendung von Rohrturbinen ermöglicht eine niedrige, der Landschaft angepasste Bauausführung des Hauptbauwerks.