Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 17

Artikel: Rechnerische Simulation von Abflüssen in Kanälen
Autor: Naef, Otto
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76574

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: 07.08.2025

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

Rechnerische Simulation von Abflüssen in Kanälen

Von Otto Naef, Baden

Bei einem Flusskraftwerk mit einer Ausbauwassermenge von 380 m³/s sollte abgeklärt werden, welche Schwallhöhen im Bereich des Oberwasserkanals bei komplettem Lastabwurf mit den aktuellen Einrichtungen und Betriebsvorschriften maximal erreicht werden, und welche baulichen sowie betrieblichen Massnahmen diese Schwallwellen gegebenenfalls reduzieren könnten. Als bauliche Massnahme kam vor allem die Möglichkeit des Umbaus einer bestehenden Kahn- oder Bootsschleuse beim Kraftwerk in Frage.

Allgemeine Gesichtspunkte

Änderungen der gewohnten Abflussverhältnisse in Kanälen z. B. von Flusskraftwerken können mannigfache Gründe haben:

- Änderung von Betriebsreglementen aufgrund von Erfahrungen, die sich im Laufe des Betriebes ergeben haben, oder Änderung des zeitlichen Wasserbedarfs, zum Beispiel temporäres Kennlinienfahren bei Spitzenlast;
- Änderung des Abflussregimes des Flusses durch neue Stau- oder Entnahmeanlagen, Flussverbauungen usw. oder Präventivmassnahmen zum Hochwasserschutz, zum Beispiel gegen gehäuftes Auftreten von Hochwasserabflüssen;
- Modernisierung der Anlagen, wie Ersetzen von ausgedienten Turbinengeneratoren durch neue.

Eine erste Beurteilung des neuen Abflussverhaltens mit eventuellen kritischen Phasen, sei es infolge Schwall, Sunk oder allgemeinen Freibord- oder Kapazitätsgrenzen, kann durch den erfahrenen Hydrauliker mit Fallstudien und Handrechnungen durchgeführt werden. Damit kann er beurteilen, ob eine genauere Abklärung des neuen zeitlichen Fliessverhaltens notwendig ist.

Für genauere Abklärungen gibt es generell drei Methoden:

- hydraulische Versuche in situ;
- hydraulische Versuche an einem physikalischen Modell;
- rechnerische Simulation des Abflussverhaltens.

Hydraulische Versuche in situ

Diese Methode ist kostengünstig und exakt, falls:

- die Versuche nicht schon *vor* einer (evtl. substantiellen) baulichen Änderung durchgeführt werden müssen;
- die Versuche mit genügend Sicherheitsreserven und unter Umständen schrittweise durchgeführt werden können;
- nicht aufwendige Messeinrichtungen und -auswertungen zur Erfassung des gesamten instationären Fliessablaufes erforderlich sind;
- der Versuchsbetrieb technisch und operationell überhaupt möglich ist.

Hydraulische Versuche an einem physikalischen Modell

Der Vorteil dieser Methode ist das Nachbilden und Erfassen auch von komplexen Abflussvorgängen. Die Genauigkeit der Resultate ist u. a. vom Massstab abhängig.
Von Nachteil sind die relativ zeitintensiven Modellversuche mit Messungen und Auswertungen, welche dadurch auch verhältnismässig teuer sind (physik. Modellversuche können ein bis mehrere Prozente der Bausumme des untersuchten Projektes kosten).

Rechnerische Simulation des Abflussverhaltens

Der Vorteil dieser Methode ist: wenn einmal die notwendigen Unterlagen (Geometrie, Randbedingungen, usw.) abgespeichert sind und das Rechenprogramm läuft, können rasch verschiedene Abflusszustände und -änderungen simuliert werden.

Ein Nachteil ist, dass praktisch nur ein- bis zweidimensionale Abflussvorgänge simuliert werden können, da sonst Rechen- und Speicheraufwand zu gross werden, falls das Problem überhaupt analytisch erfassbar ist.

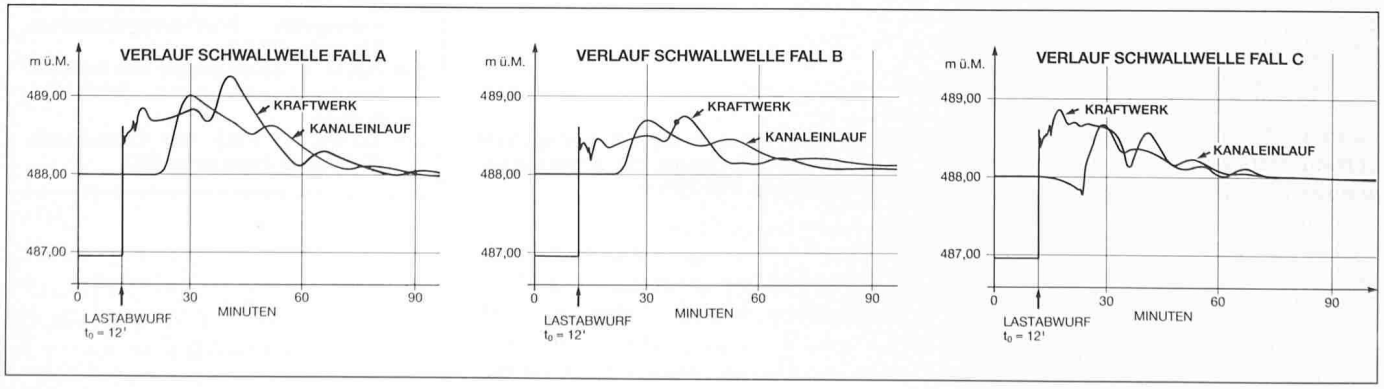
Konkretes Beispiel

Bei einem Flusskraftwerk mit einer Ausbauwassermenge von 380 m³/s sollte abgeklärt werden, welche Schwallhöhen im Bereich des Oberwasserkanals bei komplettem Lastabwurf mit den bestehenden Einrichtungen und Betriebsvorschriften maximal erreicht werden, und welche baulichen sowie betrieblichen Massnahmen diese Schwallwellen gegebenenfalls reduzieren könnten. Als bauliche Massnahme kam vor allem die Möglichkeit des Umbaus einer bestehenden Kahn- oder Bootsschleuse beim Kraftwerk in Frage.

Die Untersuchung konnte in zwei Phasen unterteilt werden:

1. Aktuelle Situation *ohne* irgendwelche Gegenmassnahmen: kompletter Lastabwurf in 4 Sekunden von 380 m³/s hinunter auf 35 m³/s Leerwassermenge (Maximalfall).
2. Aktuelle Situation *mit* Gegenmassnahmen:
   Lastabwurf wie unter 1, jedoch
   - mit Schwallentlastung beim Kraftwerk durch umzubauende Kahnschleuse,
   - Verlängern der Turbinenschliesszeit von 4 auf 10 Sekunden,
   - mit Schwallentlastung beim Flusswehr, nahe ein Kanaleinlauf.

Bild 1. Vergleich der Auswirkungen von Gegenmassnahmen



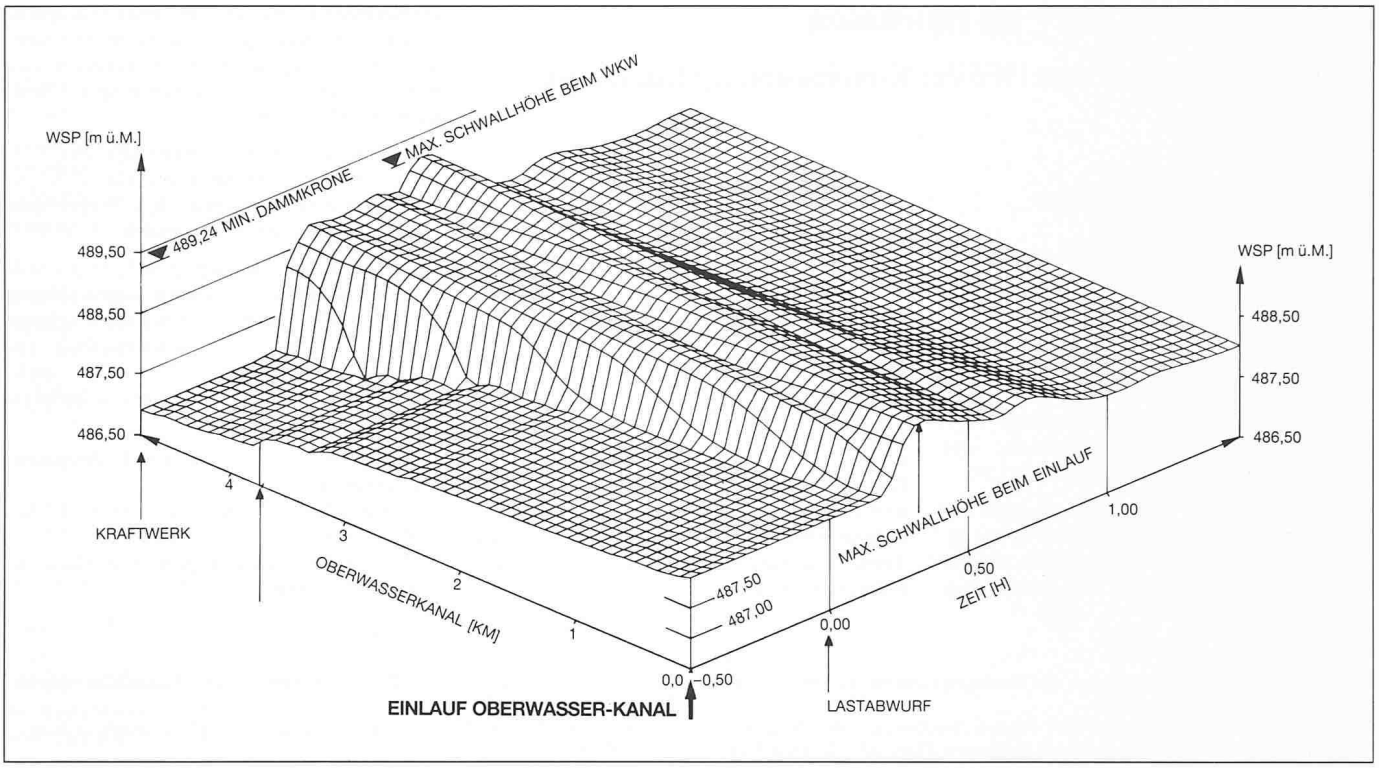


Bild 2. Entstehung und Ausbreitung einer Schwallwelle im Oberwasserkanal eines Wasserkraftwerkes in dreidimensionaler Darstellung. Der komplette Lastabwurf erfolgte in nur 4 Sekunden zur Zeit 0 : 00 und verringerte den Durchfluss schlagartig um 345 m³/s, von 380 m³/s Ausbau- auf 35 m³/s Leerwassermenge. Als Antwort auf diese plötzliche Durchflussänderung entstehen am Ort der Änderung, beim Kraftwerk, ein sogenannter Schwall im Oberwasser und Sunk im Unterwasser. Beide Phänomene pflanzen sich wellenförmig fort, der Schwall stromauf- und der Sunk stromabwärts.

Für die instationären Berechnungen wurde das firmeneigene, mathematisch-hydraulische Modell FLORIS (Flood Routing for River Systems) verwendet. Die erforderliche hohe Rechengenauigkeit von ± wenigen Zentimetern machte das Erfassen von 87 Querprofilen auf einer Kanallänge von rund 5 km notwendig. Vor dem Beginn der eigentlichen Schwalluntersuchungen wurden Eichrechnungen für verschiedene stationäre Abflüsse durchgeführt, für welche gemessene Abfluss-Pegel-Relationen zur Verfügung standen. Ebenfalls ein mit zwei Limnigraphen aufgezeichneter Lastabwurfsfall wurde zum Eichen herangezogen.

Die Resultate sind bemerkenswert: Die Verlängerung der Schliesszeit um den Faktor 2, 5, d. h. von 4 auf 10 Sekunden, brachte erstaunlicherweise eine Dämpfung der Initialschwallwelle von nur rund 10 Zentimetern.

Die andern Gegenmassnahmen sind aus den abgebildeten Hydrographen (Bild 1) ersichtlich:

□ Fall A, aktuelle Situation ohne Schwallentlastung: Der zeitliche Schwallverlauf beim Kraftwerk mit Initialschwallwelle bei Lastabwurf, etwa 1,60 m gross, gefolgt von drei weiteren Wellenkämmen – der letzte davon markant – den Maximalschwall bildend.

Die drei Wellen entstehen durch Überlagerung von Reflexionen, Schwingungen im Kanalsystem und Auffüllung des Oberwasserkanals durch den nun signifikant grösseren Zu- als Abfluss.

Am oberen Ende des Kanals sind die vier Wellen infolge unterschiedlicher Geschwindigkeiten, Reibung und Dämpfung, auf deren zwei zusammengeschmolzen. Entstehung, Verlauf und Wandlung des Lastabfallschwalls ersieht man eindrücklich aus der abgebildeten dreidimensionalen graphischen Darstellung (Bild 2).

□ Fall B, gleich wie A, jedoch mit zusätzlicher Schwallentlastung beim Kraftwerk: Die Sekundärwellen im unteren Kanalbereich konnten hier um rund einen halben Meter in der Höhe gegenüber Fall A verringert werden und erreichen nun etwa die Grösse der gedämpften Schwallwelle im oberen Bereich des Kanals. Diese konnte ebenfalls verkleinert werden, und zwar um rund die Hälfte des Reduktionsbetrages des Schwalles im Unterlauf.

□ Fall C, gleich wie A, jedoch mit zusätzlicher Schwallentlastung beim Stauwehr am Kanaleinlauf: Der Einfluss der Schwallentlastung ist gut sichtbar, logischerweise zuerst am Hydrographen des Kanaleinlaufes und mit entsprechender Zeitverzögerung im unteren Kanalende beim Kraftwerk. Diese Verzögerung, bedingt durch die Laufzeit des Entlastungsunkes, ist denn auch der Grund, warum die erste der drei markanten Sekundärwellen nicht wie die andern ebenfalls gekappt wird.

Der Erfolg der Gegenmassnahme B, das heisst mit Schwallentlastung beim Kraftwerk, ist offensichtlich am grössten, ihre Realisierung aber auch am teuersten.

Die Untersuchung hat auch gezeigt, dass mit realistischen Schliesszeitverlängerungen der Turbinen relativ wenig zur Dämpfung der Initialschwallwelle erreicht werden kann. Die Differenz zwischen maximalem Wasserstand (Sekundärwelle) und Initialwelle, im untersuchten Fall rund siebzig Zentimeter, kann durch geeignete Gegenmassnahmen (Schwallentlastungen) reduziert werden. Durch eine Kombination von Schwallentlastung am oberen und unteren Ende des Kanals gedenkt man die Wirkung von Fall B erzielen zu können, ohne grössere Umbauten an der Kahnschleuse (unter anderem Kapazitätserweiterungen) vornehmen zu müssen. Deren komplette Öffnung innert rund dreier Minuten sollte dann genügen.

Adresse des Verfassers: *O. Naef*, dipl. Bauing. ETHZ, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden.