Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 92 (2000)

Heft: 7-8

Artikel: Wasserhaushaltsregelungen und zukünftige Anforderungen an die Führung von Flussstauketten

Autor: Meier, Christian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940282

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: 07.01.2026

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

Wasserhaushaltsregelungen und zukünftige Anforderungen an die Führung von Flussstauketten

■ *Christian Meier*

1. Einleitung

Wasserwirtschaftlich in traditioneller Art vollausgebaute Flüsse weisen nach topografischen Gegebenheiten optimierte Staustufen mit einem Minimum an dazwischenliegenden Freifliessstrecken auf. Solche Flussstauketten stellen wasserwirtschaftlich gesehen eine funktionale Einheit dar. An etlichen Schweizer Flüssen werden die einzelnen Stufen aber von unterschiedlichen Gesellschaften meist autonom voneinander betrieben.

> Durch die Verschiebungen in den Eigentumsverhältnissen im Rahmen der Strommarktliberalisierung ergeben sich grosse Chancen, die Flussstauketten nach neuesten Gesichtspunkten zu bewirtschaften.

Automatisierte Staustufen werden von einer so genannten Wasserhaushaltsregelung in ihrem Abflussverhalten gesteuert respektive geregelt. Diese Wasserhaushaltsregelungen basieren mehrheitlich auf Pegelregelungen und führen die in der Konzession festgeschriebenen wasserwirtschaftlichen Aufgaben aus. Bei Störungen, Spülungen, in Ausnahmesituationen und bei Hochwasser sind häufig Handeingriffe nötig, um unerwünschte Schwalleffekte zu vermeiden respektive auszudämpfen. Auch die Unterlieger werden informiert, damit auch diese geeignete Massnahmen treffen können.

Diese Vorabinformation und entsprechende Massnahmen wie Vorabsenkung, Aufstau, Umschaltung auf Durchflussregelung lassen sich automatisieren. Damit können in Flussstauketten unerwünschte dynamische Effekte in der Wasserführung vermieden, die Energieproduktion optimiert und die Hochwassersicherheit erhöht werden.

Der vorliegende Artikel stellt den aktuellen Stand der Technik dar und bietet einen Ausblick.

2. Anforderungen an die Führung von Flussstauketten

2.1 Eigenschaften einer Flussstauhaltung

Für die einleitenden Betrachtungen werden Flussstauketten bewusst vereinfacht dargestellt. Die gewählten Vereinfachungen betreffen die Unterteilung des Flussabschnittes in den nicht eingestauten Teil, die Freifliessstrecke, und den gestauten Teil, die Staustrecke. Den Übergang von Freifliess- zu Staustrecke nennt man Stauwurzel, obwohl auf einer längeren Strecke ein kontinuierlicher Übergang auftritt. Die Betrachtung mit einer klar definierten Stauwurzel beschreibt aber alle Effekte qualitativ richtig. Für eine auch quantitativ richtige Simulation sind hingegen diskrete Modelle mit 15 bis 31 Gerinne-Abschnitten notwendig [1].

Flussstauhaltungen (Bild 1) bestehen aus den folgenden Elementen:

- Freifliessstrecke
- Staustrecke
- Sperrstelle

Die Freifliessstrecke ist der Flussabschnitt oberhalb der Stauwurzel. Dieser Abschnitt, als Rinne mit einem Wasserspiegel, der näherungsweise parallel zur Flusssohle verläuft, wird mit zunehmendem Abfluss höher gefüllt, Volumen des steigenden Abflusses wird also in der Rinne zurückgehalten. Dieses Füllverhalten ist charakterisiert durch die Retentionszeit T_r. Diese ist definiert als Zeit für die Volumenänderung, d.h. Füllung der Fliessstrecke, für eine gewisse Abflussveränderung.

Die zweite Zeitkonstante ist die Wellenlaufzeit T_l, definiert als Totzeit vom Ein- bis zum Ausfliessen einer Welle aus der Fliessstrecke. Sie ist nicht gleich der Fliesszeit, sondern ihr überlagert. Das heisst, dass die Wellenlaufzeit mit der Fliessrichtung kürzer ist als gegen diese. F_{w1} ist die Übertragungsfunktion von Schwallwellen, auch höherer Ordnung, in der Freifliessstrecke.

Die Staustrecke ist der Flussabschnitt von der Stauwurzel bis zur Sperrstelle, mit der charakteristischen Zeitkonstante T_{as}, der Integrationszeit des Stauraums. Diese ist definiert als Zeit für die Volumenänderung, d.h. Füllung des Beckens für ein gewisses Ungleichgewicht von Zu- und Abfluss.

F_{w2} ist die Übertragungsfunktion der Sunk- und Schwallwellen in der Staustrecke. Diese beschreibt die «Sloshing-Effekte», das so genannte Stauraumschwappen.

Die Sperrstelle besteht aus dem Stauwehr mit den Wehrschützen, Schleusen und Turbinen.

Ausleitungskraftwerke verfügen zusätzlich über die Triebwasserführung mit Kanal respektive Stollen, dem Kraftwerk, der Restwasserdotierung am Wehr und der Restwasserstrecke im ursprünglichen Flussbett.

Die Eingangsgrössen zum System «Flussstauhaltung» (Bild 2) sind:

- der stochastische Zufluss Q_{ZU}
- der zu regelnde Abfluss Q_{AB}

Die Ausgangsgrösse des Systems für die Belange des Wasserhaushalts ist der Oberwasserpegel H_{OW}.

Das System ist nichtlinear, da alle Parameter von der Wasserführung abhängig sind. Mit steigendem Durchfluss ergeben sich kürzere Pegelanstiegszeiten und eine stärkere Wellendämpfung. Das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke bedingt auch eine Parameteradaption des Reglers.

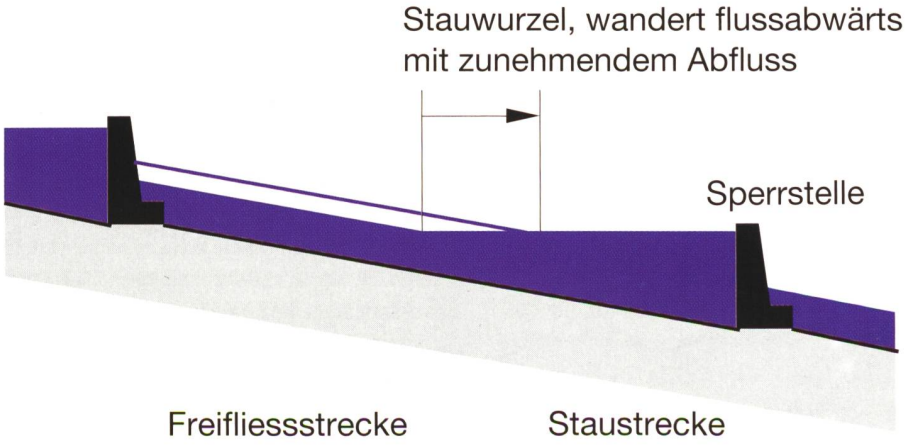

Bild 1. Elemente einer Flussstauhaltung.

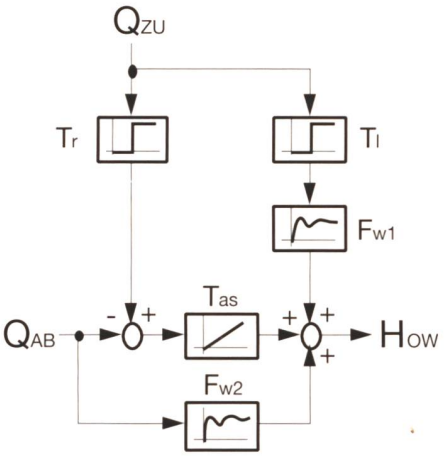

Bild 2. Regelsystem «Flussstauhaltung».

2.2 Ganglinien als Gradmesser für den Wasserhaushalt

Der zeitliche Verlauf des Abflusses an einer betrachteten Stelle wird als Ganglinie bezeichnet. Für die Stauhaltung unterscheidet man Zufluss- und Abflussganglinie.

Für eine Flussstauhaltung hängt der Verlauf von Zufluss- und Abflussganglinie von der Betriebsart der Staustufe ab (Bild 3). Es sind alle möglichen Verläufe denkbar, solange die Kontinuitätsgleichung erfüllt bleibt. Bei kleinen Speichervolumina sind in jedem Fall nicht beliebige Phasenverschiebungen möglich, die drei typischen Fälle sind:

- Kongruente Ganglinien
- Vergleichmässigte Ganglinien
- Überhöhte Ganglinien

Kongruente Zu- und Abflussganglinien sind deckungsgleich, aber mit einer zeitlichen Verschiebung. Die meisten Flussnutzungen bevorzugen eigentlich ein solches Verhalten, es führt aber zu Pegelvariationen an der Sperrstelle, da bei Abflussänderungen Stauvolumen in Retentionsvolumen umgewandelt werden muss.

Vergleichmässigte Ganglinien decken das Bedürfnis, auflaufende Hochwässer

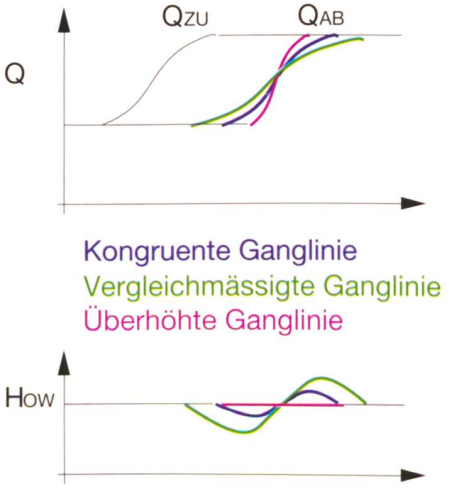

Bild 3. Verschiedene Betriebsarten einer Flussstauhaltung.

abzudämpfen, und andererseits für Schifffahrt und Grundwasserhaushalt keine schnellen und unnötigen Änderungen zu provozieren. Dazu muss aber nochmals zusätzliches Stauvolumen umgelagert werden, was zu noch grösseren Pegelvariationen als bei kongruenten Ganglinien führt.

Die optimale Energieproduktion der Staustufe erfolgt mit maximalem, d.h. konstantem Staupegel. Da jede Zuflussvariation mit einer Retentionsvolumen-Variation einhergeht und sich die Zuflussänderung an der Sperrstelle somit zu lange nicht bemerkbar macht, so muss mit einer übermässigen Abflussveränderung das zu hoch gefüllte Stauvolumen abgebaut werden. Dies führt zwangsläufig zu einer Ganglinien-Überhöhung.

2.3 Kette von Flussstauhaltungen

Der Ausbau der grossen mitteleuropäischen Flüsse ist soweit fortgeschritten, dass alle auf weiten Strecken Flussstauketten aufweisen. Da aber viele dieser Kraftwerksstufen mit reinen Pegelreglern ausgerüstet sind, so überhöhen sich die Ganglinien von Stufe zu Stufe immer mehr. Dies ergibt eine Wasserführung, die sich stark von derjenigen im ursprünglichen Fliessgewässer unterscheidet.

2.4 Anforderungen an die Führung von Flussketten

Die Anforderungen an die Führung von Flussstauketten bleiben prinzipiell gleich wie in der Vergangenheit, die Gütekriterien werden hingegen erhöht, sei es aus energiewirtschaftlichen Gründen oder weil Störfälle und Überflutungen zu verschärften Auflagen führen.

Die nachfolgende Auflistung der Anforderungen erfolgt nicht in der Reihenfolge einer Gewichtung, diese ist von Fall zu Fall unterschiedlich:

- Bedarfsgerechte Stromproduktion
- Maximierte Stromproduktion
- Vermeidung von schnellen und unnötigen Pegel- und Durchflussänderungen
- Abflussvergleichmässigung zu Gunsten leistungsstarker Unterlieger-Kraftwerke
- Kappung von Hochwasserspitzen
- Beherrschung von weiteren Ausnahmesituationen

Bedarfsgerechte Stromproduktion, sei es als Tertiärregelung im Schwellbetrieb oder kurzfristig als Primärregelung, ist beschränkt auch in Flüssen möglich. Eine darauf ausgerichtete Führung soll bezwecken, dass auch Laufwasserkraftwerke im Rahmen der Möglichkeiten einen Beitrag an die Netzregelung leisten.

Für eine maximierte Stromproduktion, also maximierte Fallhöhen, sollen immer, wenn stationäre hydraulische und elektrische Verhältnisse herrschen, die Pegel an den Sperrstellen aufs Maximum herangeführt werden.

Um den Anliegen von Schifffahrt, Uferschutz, Fischerei und Grundwasserhaushalt gerecht zu werden, sollen schnelle und unnötige Pegel- und Durchflussänderungen vermieden werden.

Eine Abflussvergleichmässigung, welche die Produktion derjenigen Kraftwerke mit relativ grossem Stauvolumen zwar leicht schmälert, kann leistungsstarke Unterlieger mit kleinem Stauvolumen, z.B. Kanalkraftwerke, in ihrer Produktion weit mehr begünstigen [2].

Durch rechtzeitige Schaffung von Pufferräumen sowie deren zeitgerechte Bewirtschaftung sollen Hochwasserspitzen gekappt werden.

Störfälle, Spülungen sowie weitere Ausnahmesituationen sollen sicher beherrscht werden können.

2.5 Zentrale Staukettenführung

An Flüssen, die als Wasserstrassen genutzt werden, sind die betrieblichen Einrichtungen zur zentralen Führung bereits vorhanden. Der Abfluss aus den einzelnen Staustufen wird von einer Leitwarte aus koordiniert gefahren (Mosel, Weser, Neckar).

Einige wenige Flüsse werden für die Netzregelung beigezogen. Diese verfügen über Betriebsführungsinstrumente [3], die computerunterstützte Vorhersagen und Szenarien in den Betriebsablauf einbringen (Drau, Enns, Rhone, Oberrhein).

3. Pegelregelung als «Wasserhaushaltsautomatik»

Die Automatisierung der Flussstaustrecken in der Schweiz erfolgt im Allgemeinen durch dezentral in den einzelnen Staustufen eingesetzte Regler. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Pegelregelung (Bild 4), wobei:

- Q_{soll} die Stellgrösse ist,
- Q_{zu} die Störgrösse ist,
- OW die Regelgrösse ist.

Die häufigste, weil einfachste, Reglerstruktur ist die eines PI-Reglers, wobei die Abweichung der Regelgrösse verstärkt und integriert wird. Der Zufluss als Störgrösse weist bis zur Pegelmessstelle eine grosse Totzeit auf. Um Pegelvariationen aber zu vermeiden, muss daher die Reaktionsgeschwindigkeit des Reglers relativ hoch gesetzt werden.

Der P-Anteil wird so eingestellt, dass für eine gegebene Pegelabweichung eine gewünschte Abflussverstellung erreicht wird. Anschliessend wird der I-Anteil so eingestellt, dass für den geschlossenen Regelkreis ein Dämpfungsfaktor von 1 resultiert. Liegt der I-Anteil über der ersten Eigenfrequenz der Übertragungsfunktion F_{w2} und verfügt immer noch über Reserven gegenüber der grössten

Hochwasser-Anstiegsflanke, so ist die Parametrierung geglückt, anderenfalls ist ein anderer P-Anteil vorteilhafter.

Variiert der Durchflussbereich stark, so ändern sich die Parameter der Regelstrecke. Somit müssen die Parameter des PI-Reglers abhängig vom Zustand gemacht werden. Um für alle Abflüsse die gleiche Dämpfung zu erhalten, muss mit abnehmender Integrationszeit des Stauraums T_{as} (steigender Zufluss), die Zeitkonstante T_n des I-Anteils um den gleichen Betrag reduziert werden. Mit zunehmendem Zufluss nimmt auch die Retentionszeit T_r zu, sodass eine kleine Vergrösserung von T_n nötig wird. Im Allgemeinen ist aber T_{as} empfindlicher als T_r auf Durchflussänderungen, und der Einfluss von T_r kann vernachlässigt werden.

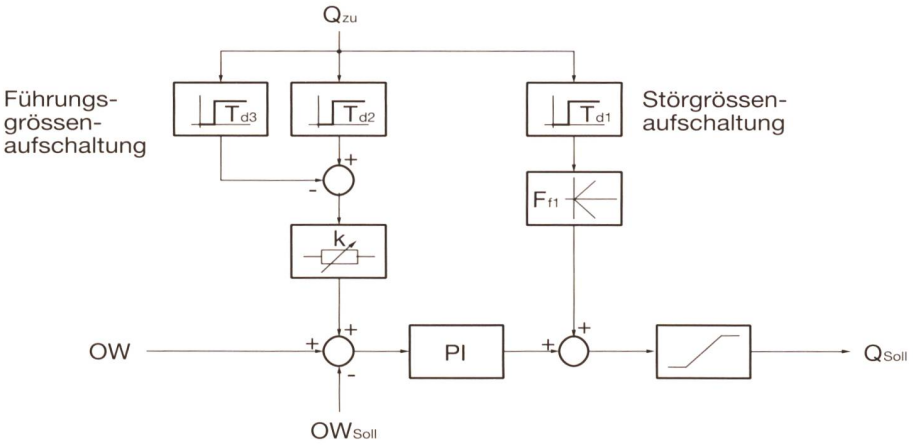

Bild 4. Prinzip der Pegelregelung.

3.1 Schwachstellen von reinen PI-Reglern

Wegen der untypischen Verknüpfung der Systemgrössen ist die Regelgüte jeweils nur für eine Systemgrösse optimierbar. Eine perfekte Pegelhaltung führt somit zu starken Bewegungen der Stellgrösse. Um ein ausgewogenes Verhalten der gesamten Staukette zu erreichen, sollen die Abflussganglinien zumindest nicht überhöht werden. Die Vergleichmässigung kann sich fallweise aufdrängen, z.B. für die Oberlieger des Rheinhafens Schweizerhalle [4], wo aus Schifffahrtsgründen stationäre Verhältnisse vorteilhaft sind.

Aus diesem Grund sind zwei verbesserte Lösungsansätze für die Pegelregelung entstanden:

- Störgrössenaufschaltung
- Führungsgrössenaufschaltung

Diese haben zum Zweck, einen genau definierbaren Kompromiss zwischen exakter Pegelhaltung (= maximaler Energieproduktion) und den Anliegen anderer Flussnutzungen zu ermöglichen.

3.2 Störgrössenaufschaltung

Bei der Störgrössenaufschaltung handelt es sich um einen Feedforward-Regler, der durch die Antizipation entweder die Zielsetzung der kongruenten Ganglinien erfüllt oder zumindest eine bessere Pegelregelgüte ermöglicht [5].

Der Zuflusswert Q_{zu} wird mit der Totzeit T_{d1} verzögert und mit F_{f1} so konditioniert, dass transiente Zuflussstörungen herausgefiltert werden. Die einzustellende Totzeit T_{d1} entscheidet über die Wirkung der Störgrössenaufschaltung. Kongruente Ganglinien resultieren, wenn T_{d1} gleich der Differenz von Retentionszeit T_r und Laufzeit T_l ist. Wenn T_{d1} kürzer eingestellt wird, so ergibt sich ein gleichmässiger Abfluss, bei längerer Zeit erhöht sich die Pegelkonstanz.

Da die Optimierung der Regelgüte über Tuningmassnahmen im Störgrössen-Pfad erreicht wird, kann die Parametrierung des PI-Teils vollständig auf die physikalischen Eigenschaften der Staustrecke hin optimiert werden.

Wichtig ist, dass Retentions- und Laufzeit T_r und T_l mit dem Durchfluss stark variieren. Daher muss T_{d1} vom Durchfluss abhängig gemacht werden.

3.3 Führungsgrössenaufschaltung

Der letzte Verbesserungsansatz ist die so genannte Führungsgrössenaufschaltung. Auch in diesem Fall handelt es sich um einen Feedforward-Regler. Der OW-Sollwert wird so verändert, dass eine Abfluss-Vergleichmässigung erreicht wird [6].

Der Zuflusswert Q_{zu} wird einerseits verzögert mit der Totzeit T_{d2} und andererseits verzögert mit der Totzeit T_{d3}. Die Differenz der beiden Werte wird mit k gewichtet und dem eingestellten Pegelsollwert überlagert.

Die Totzeit T_{d3} soll gleich der Retentionszeit T_r sein und T_{d2} gleich der Laufzeit T_l. Da T_r und T_l mit dem Durchfluss variieren, müssen T_{d2} und T_{d3} vom Durchfluss abhängig gemacht werden.

Die Führungsgrössenaufschaltung arbeitet gegen die Störgrössenaufschaltung. Damit wird die Pegelregelgüte weiter verschlechtert gegenüber der Störgrössenaufschaltung. Der massgebende Vorteil ist aber, dass Durchflussstörungen zur nächsten Staustufe hin verkleinert werden können.

Für diese Art von Regelung ist eine Überprüfung der Reglerfunktion durch eine Simulation besonders empfehlenswert.

3.4 Welche Pegelregelmethode soll eingesetzt werden?

Es zeigt sich, dass einzig im Fall der Störgrössenaufschaltung eine Reglerparametrierung eingestellt werden kann, die exakt auf das dynamische Verhalten des Stauraums hin optimiert werden kann. Das «Schätzen der Störgrösse» muss nicht vom Regler mitausgeführt werden. Die Störgrössenaufschaltung hat gegenüber der Führungsgrössenaufschaltung den Vorteil, dass für die Reglereinstellung nur in seltenen Fällen eine vorgängige Simulationsrechnung nötig ist.

Bei der Führungsgrössenaufschaltung hingegen wird der Einfluss der Störgrösse über den P- und I-Anteil geführt, womit bei der Parametrierung Kompromisse unvermeidlich sind.

Da die Störgrössenaufschaltung im wesentlichen den Oberliegerabfluss direkt an die Stellorgane weitergibt, stellen sich an die Abflusswerte der Oberliegerstufen neue Anforderungen. So muss neben der Sicherheit gegen Übertragungsfehler auch die absolute Genauigkeit des Messwertes deutlich besser sein als die in der Vergangenheit übliche Genauigkeit von rund ±5 %.

Für die Führungsgrössenaufschaltung hingegen ist die absolute Genauigkeit von untergeordneter Bedeutung, da für die Regelung eine Differenz desselben «ungenauen» Signals verwendet wird. Da für die Führungsgrössenaufschaltung die Regulierung vollständig über die Regelabweichung des Pegels erfolgt, sind Beeinträchtigungen des Pegel-Istwertes, z.B. durch Windstau oder Schifffahrt, nachteilig für diese Regelung.

Fazit:
Wenn es technisch vertretbar ist, soll **immer** die Störgrössenaufschaltung realisiert werden. Betreiber einer Staustufe sollten im übergeordneten Interesse einen Signalaustausch mit den Ober- wie Unterliegern zulassen. Zumal heute die Kosten der dafür notwendigen Fernwirkeinrichtungen, z.B. auf Basis von Telekom-Leitungen, fast vernachlässigbar klein geworden sind.

4. Probleme in der Praxis

Die Störgrössenaufschaltung bedingt relativ genaue Abflusswerte. Die Eichung kann beispielsweise über Limnigraphenaufzeichnungen erfolgen. Die Auflösung der Limnigraphenwerte nimmt aber zu ganz kleinen Abflüssen hin extrem ab, und für ganz grosse Abflüsse liegen meist keine Eichwerte vor.

Wenn die Turbinenabflüsse für kleine Wasserführungen und die Wehrabflussmengen auch für grösste Werte exakt ermittelt werden können, sind die wesentlichsten Probleme gelöst.

4.1 Bestimmung des Turbinenabflusses

Die Ermittlung von ganz kleinen Abflüssen reduziert sich auf die genaue Bestimmung der Turbinenabflüsse. Die in Flusskraftwerken seit den Zwanzigerjahren hauptsächlich eingesetzten Turbinen sind doppelt regulierte Kaplan- oder Rohrturbinen. Dieser Turbinentyp verfügt neben dem verstellbaren Leitapparat zusätzlich über verstellbare Laufradflügel, was für ein breites Einsatzspektrum bezüglich Fallhöhe und Durchfluss sorgt.

Der Umstand, dass zwei zum Teil unabhängig voneinander verstellbare durchflussbestimmende Organe hintereinander geschaltet sind, schränkt die Genauigkeit der lediglich auf der Stellung eines Organs beruhenden Umrechnungen stark ein.

Die Genauigkeit kann massiv gesteigert werden, wenn beide Schaufelstellungen, zusammen mit Turbinendrehzahl und Fallhöhe, mittels eines statischen Modells in den Durchfluss umgerechnet werden.

Diese Methode gilt heute als ausgereift und liefert bei relativ geringem messtechnischen Aufwand eine hoch genaue Aussage über den Turbinendurchfluss, die absolute Messunsicherheit ist kleiner als 2% und die Wiederholgenauigkeit besser als 1%.

Falls die Messgrösse geeicht werden muss, so kann dies durch Vergleich des Wirkungsgrades mit den Garantiewerten erfolgen. Es ist zu beachten, dass Quervergleiche mit relativen Methoden (z.B. mit Winter-Kennedy) lediglich die Linearität bestätigen können.

Die Ultraschallmessung gilt als absolutes und genaues Messprinzip. Ihr Einsatz ist aber für Niederdruckmaschinen ungeeignet, da diese in keinem Strömungsquerschnitt eine genügende Homogenität und Drallfreiheit aufweisen.

4.2 Bestimmung des Wehrabflusses

Die rechnerische Bestimmung des Wehrabflusses ist bei sehr grossen Wasserführungen problematisch und kann zu grossen Ungenauigkeiten führen:

- Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Einschnürungskoeffizienten c_q
- Bestimmung der Fallhöhe

Der Einschnürungskoeffizient c_q ist nur gerade bei moderaten Wehrabflüssen genügend konstant, bei extrem grossen Abflüssen ist er abhängig vom Betriebspunkt. Entsprechend sind in der Wasserhaushaltsautomatik die Werte von c_q adaptiv zu gestalten.

Auf Grund der grossen räumlichen Ausdehnung der von der Schütze bei grossen Abflüssen beeinflussten Strömung ist die Bestimmung der für den Abfluss relevanten Fallhöhe nicht einfach. Sie kann somit weit von der rechnerischen Differenz der Sensorsignale von Ober- und Unterwasserpegel abweichen, diese müssen daher nachbehandelt werden.

4.3 Ausfallsicherheit der Oberliegersignale

Die Sicherheit gegen Signalunterbruch ist gewährleistet, wenn die Zuflussinformationen zweikanalig zur Wasserhaushaltsautomatik übertragen werden (2 Sensoren, 2 Linien).

Falls nur eine einkanalige Übertragung vorhanden ist, so ist das Signal zweckmässig zu überwachen, und bei Ausfall muss der Regler auf eine Ersatzbetriebsart umgeschaltet werden. Dies kann beispielsweise eine normale Pegelregelung sein, wobei einerseits die Parameter umgeschaltet und Umschaltstösse verhindert werden müssen.

5. Ausblick

Die zentralisierte Führung von Flussstauketten bietet gegenüber den vorgenannten dezentralen Wasserhaushaltsregelungen zusätzliche Möglichkeiten, insbesondere in den Bereichen:

- Volumenbilanzregelung zur genau vorbestimmten Abflusssteuerung des ganzen Flusssystems
- Aktiver Hochwasserschutz, basierend auf den Hilfsmitteln der Volumenbilanzregelung

Damit diese und ähnliche neue Methoden auch ihre volle Wirksamkeit entfalten können, sind Implementation, Betrieb und Kostenträger solcher Einrichtungen zwischen den verschiedenen Flussnutzern zu regeln.

Das Ziel wäre, auch in voll ausgebauten Flüssen ein Hochwasserauflaufverhalten zu erreichen wie in naturbelassenen Flussstrecken. In Bild 5 ist die Verflachung einer Hochwasserwelle im nicht ausgebauten Unterlauf der Reuss bis Mellingen ersichtlich.

5.1 Computersimulation als Betriebsführungs- und Ausbildungsinstrument

Um mehr Erkenntnisse für das komplexe Verhalten von Flussstauhaltungen zu erhalten, sind heute Computersimulationen üblich, in gewissen Fällen unter Einbezug der vorgesehenen Regulierungen [2].

Je nach Zielsetzung, geforderter Flexibilität in der Programmierung, Integration von Regelungen/Steuerungen, Darstellung der Resultate sowie verfügbarer Rechnerleistung sind unterschiedliche Programme auf dem Markt erhältlich. Allen gemeinsam ist die Lösung der partiellen Differenzialgleichungen nach de Saint-Venant.

5.2 Volumenbilanzregelung

Die Volumenbilanzregelung basiert im Wesentlichen auf den oben genannten Werkzeugen zur dynamischen Simulation, mit dem Unterschied, dass diese nun mit realen Messwerten und online ablaufen.

In der Volumenbilanzregelung werden über verschiedene «Beobachter» die in der Staukette vorhandenen Volumina mitlaufend berechnet und dargestellt.

Die zustandsabhängigen Volumina werden in die Regelung mit einbezogen. Dies ist aber erst ausnahmsweise implementiert, so in Bremgarten-Zufikon für die Absenkung des Stauraums bei Extremhochwasser oder in Albbruck-Dogern für die Bewirtschaftung des Aubeckens, das als Puffervolumen für die Pumpspeicherwerke des Schluchsees angelegt wurde.

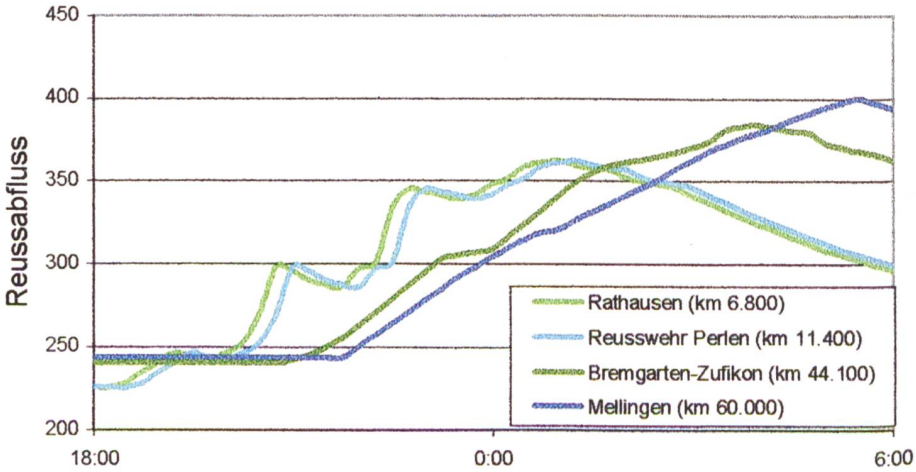

Bild 5. Verflachung einer Hochwasserwelle flussabwärts.

Es muss angemerkt werden, dass Pegelregelungen diese Volumenbetrachtung ebenfalls beinhalten, ist doch eine Pegeländerung das Mass für die Stauvolumenänderung.

Nicht einbezogen wird hingegen die Veränderungen des Retentionsvolumens, somit kann es auch nicht bewirtschaftet werden.

Über fest eingestellte Algorithmen oder neu auch über flexible, in Fuzzi-Logic formulierte Strategien können nun diese Volumina aktiv bewirtschaftet werden. Dies geschieht ähnlich, wie es bereits für Schwellbetrieb eingerichtete Stauketten an der Drau [3] oder an bayrischen Voralpenflüssen ausführen, allerdings mit dem Unterschied, dass am Schluss der Kette kein nennenswertes Puffervolumen für die Abflusshomogenisierung eingesetzt werden kann. Das heisst, dass diese Regelung wesentlich höhere Gütekriterien erfüllen muss.

Die sich zuständsabhängig ergebenden Zielvolumenänderungen werden den für die einzelnen Staustufen prognostizierten Abflussganglinien überlagert. Diese Zielwerte werden als Abfluss-Sollwerte an die Staustufen ausgegeben. Diese verfügen nur noch über einen schwachen Pegelregler, um die Staukoten auch bei kleinen Ungenauigkeiten in der Prognose in etwa einzuhalten.

5.3 Aktiver Hochwasserschutz

Mit der vorgängig beschriebenen Volumenbilanzregelung kann nun auch der Hochwasserschutz deutlich verbessert werden, indem noch verfügbare Puffervolumina besser bewirtschaftet und situationsgerecht Puffervolumina geschaffen werden können. Dies wird erst ermöglicht, wenn diese Volumina, insbesondere neu auch die Retentionsräume, zustandsabhängig ermittelt und dargestellt werden.

Für die Führung von Flussstauketten ergeben die heute verfügbaren Möglichkeiten wesentlich sicherere und wirtschaftlichere Lösungen, die mit geringem Aufwand realisiert werden können.

Adresse des Verfassers: *Christian Meier,* dipl. Ing. ETH SIA, Berater für Energieunternehmen, CH-8103 Unterengstringen.

Literaturhinweise

[1] *Chapuis, J.:* Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken, Diss. ETH Zürich Nr. 12765, 1998.

[2] *Meier, C.:* Advanced Water Management results in added Capacity, Töging Plant, Germany, URHP 1999 Proceedings, Wilmington Business Publishing, 1999.

[3] *Hülsemann, M., Wiesinger H.:* Patentschrift DE 196 3 853 C2 Verfahren zur Leistungsermittlung sowie zur Optimierung des Einsatzes von Kraftwerken einer Schwellkette, Deutsches Patent- und Markenamt, 2000.

[4] *Fäh, R.:* Digitale Simulation von Stauregelungen in Flusssystemen, 4. Symposium Simulationstechnik, Proceedings Springer Verlag, Berlin, 1987.

[5] *Beltzig, C., Schlageter, G.:* Automatisierung der Wasserwirtschaft am Hochrhein und Modernisierung eines Kraftwerks am Zusammenfluss von Aare und Rhein. VDI-Bericht Nr. 1252, 1996.

[6] *Bernhauer, W., Gähwiler, J.:* Automatisierung von Laufwasserkraftwerken am Inn, «Wasser, Energie, Luft», Schweiz, Heft 11/12, 1982.

Développement durable et énergie

■ *Sosin*

Quels sont les impacts des différentes sources d'énergie en termes de développement durable? Mandatés par la Société suisse des ingénieurs nucléaires (Sosin), plusieurs spécialistes et enseignants des écoles polytechniques fédérales ont donné des éléments de réponse originaux à cette question. Ils soulignent notamment la nécessité de réduire le rôle écrasant des énergies fossiles.

Présentée à la presse le 5 mai dernier, l'étude «Développement durable et énergie» repose sur un constat initial: l'énergie est une nécessité. Elle est un facteur de survie pour l'homme, la garantie de son accès à des conditions de vie supportables et de la sauvegarde des équilibres écologiques. Cela dit, un recours irréfléchi aux sources traditionnelles entraînera l'épuisement rapide des réserves et une accumulation dangereuse des gaz à effet de serre.

En commanditant et en publiant cette étude, la Sosin entend fournir une contribution objective au débat sur la durabilité. Réalisé par les professeurs Gérard Sarlos et Wolfgang Kröger, et les physiciens Pierre-André Haldi et Stefan Hirschberg, ce document constitue une aide à la décision en matière de choix énergétiques.

Comme l'a souligné lors de la réunion de presse M. Willy Roos, président de l'Académie suisse des sciences techniques (ASST), il ne s'agit pas d'imposer à tous les peuples de la planète les modes de vie des pays occidentaux. Il convient en revanche de leur faciliter l'accès à un niveau d'existence acceptable pour eux, dans les espaces vitaux auxquels ils sont habitués: «Le grand défi auquel nous sommes confrontés consistera à garantir de manière durable la couverture des besoins croissants en nourriture, en eau et en énergie, sans compromettre les chances de survie des générations futures.»

Les quatre experts auteurs de l'étude constatent dans un premier temps que la durabilité du secteur énergétique suppose un usage plus rationnel des agents primaires et un recours accru aux énergies de substitution, à commencer par l'hydraulique, le nucléaire et les agents renouvelables, solaire et biomasse en particulier. Après avoir passé en revue l'ensemble des caractéristiques de chaque agent énergétique, ils rappellent que chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients en matière de durabilité. Et de souligner à ce propos qu'un renoncement au nucléaire entraînerait à l'échelle mondiale une hausse annuelle de 8% des rejets de gaz carbonique (CO_2), ce qui va à l'encontre de toutes les décisions internationales relatives à la sauvegarde des équilibres climatiques. L'étude va plus loin en préconisant un rôle accru de l'atome dans le cadre d'un «mix» énergétique propre aux exigences du développement durable.

Pour la Suisse, une politique conforme à ces exigences repose sur une stabilisation de la consommation d'énergie en général et d'électricité en particulier et sur le maintien en activité des centrales nucléaires existantes aussi longtemps que les circonstances techniques, économiques et de sécurité le permettent. Dans tous les cas, le remplacement même partiel de l'électricité nucléaire par du courant d'origine fossile serait incompatible avec les exigences du développement durable.