

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Band: 95 (2003)
Heft: 5-6

Artikel: Korrektur wasserbaulicher Abflusskurven auf der Basis inverser Bilanzmodellierung : Konzept und Anwendung
Autor: Kuhlmann, Ulrich / Zarfi, Gerhard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939453>

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: 15.10.2024

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

Korrektur wasserbaulicher Abflusskurven auf der Basis inverser Bilanzmodellierung – Konzept und Anwendung

■ Ulrich Kuhlmann, Gerhard Zarfl

Problemstellung

Die Ennskraftwerke AG (Steyr, A) betreiben eine geschlossene Kette von 10 Staustufen auf dem oberösterreichischen Gebiet der Enns – mit ca. 6500 Mio. m³/Jahr einer der grösseren Nebenflüsse der Donau. Die 10 Laufkraftwerke nutzen Ausbaufallhöhen zwischen 8 und 24 m und besitzen eine Gesamtausbauleistung von 375 MW. Die Staustufe wird im Schwellbetrieb gefahren mit einer jährlichen Stromerzeugung von durchschnittlich 1745 GWh. Die jeweils 2 bis 5 Wehrfelder der Staustufen sind unterschiedlich ausgestattet. Abhängig vom Alter der Anlagen sind Unterschütze, (Doppel-)Hakenschtütze oder Segmentverschlüsse mit aufgesetzten Klappen installiert.

Vor allem im Hochwasserfall kommt es immer wieder zu Problemen, wenn innerhalb der mehrtägigen Hochwasserwelle regelungsbedingte Pegelschwankungen auftreten, die sich durch die Staustufen fortsetzen und sich vergrössern. Dabei werden kurzfristige Abflussänderungen von mehr als 100 m³/s beobachtet (Bild 3). Anhand eines Hochwasserereignisses vom Oktober 1996 (HW-10/96) kann mit Hilfe einer Summenbilanz über die gesamte Staustufe gezeigt werden, dass die Regelungsprobleme in der Übermittlung ungenauer Wehrdurchflüsse aus den Kraftwerken begründet sind. In der Gegenüberstellung der aufsummierten Durchflussmengen in den einzelnen Staustufen wird die Inkonsistenz der berechneten Abflüsse deutlich (Bild 2). Da Retentionseffekte im Grössenbereich dieser Hochwasserabflüsse vernachlässigbar sind, müsste sich von Stufe zu Stufe ein kontinuierliches Anwachsen der Durchflusssummen ergeben. Am Beispiel KW Ternberg zeigt Bild 3 die Abweichungen zwischen den übermittelten Abflüssen und denjenigen des Oberliegert (inkl. Zwischenzubringer). Trotz grosser Mengen an erhobenen Betriebsdaten wie Wehrstellungen, Pegelganglinien usw. können also die Wehrdurchflüsse nur ungenügend genau ermittelt werden. Dabei stützt sich die vom Prozessrechner der Kraftwerke vorgenommene Wehrdurchflussberechnung auf Abflussbeziehungen, die zum Teil aus älteren wasser-



Bild 1. Situation der Enns-Staukette.

baulichen Modellversuchen, zum Teil mit Hilfe hydraulischer Standardbeziehungen abgeleitet wurden.

Zielsetzung

Eine adäquate Hochwasserregelung lässt sich nur auf der Basis zuverlässiger Abflussdaten bewerkstelligen. Daher ist erstes Ziel des Projektes, die widerspruchsfreie Ermittlung der Wehrdurchflüsse sicherzustellen. Ausgehend von vorhandenen Hochwasserdaten (gemessene Pegelstände, Stellgrößen, Maschinendurchflüsse usw.) sollen die implementierten Abflussbeziehungen so an-

gepasst werden, dass sich konsistente Durchflüsse über die gesamte Staustufe ergeben. Hierzu wird versucht, die relevanten Wehrparameter eines existierenden Bilanzmodells mit Hilfe inverser Modellierung zu optimieren, wobei auch weitere unsichere Input-Größen, wie beispielsweise die Zuflussparameter der Zwischenzubringer, zu berücksichtigen sind. Die Tatsache, dass neben den Messfehlern der Datenreihen auch Fehler aus vereinfachenden Modellannahmen in die Rechnungen eingehen, führt zu einer statistischen Formulierung des Problems. Diese Betrachtungsweise ermöglicht die Schätzung optimaler Modellparameter auf Grundlage der gemessenen Betriebsdaten.

Um ebenso die physikalische Plausibilität der Durchflussbeziehungen zu gewährleisten, werden die neuen Wehrkennlinien anschließend einer manuellen Nachbehandlung unterzogen. Vor allem die Übergänge zwischen den errechneten und den ursprünglichen Bereichen der Kurven, die nicht durch die historischen Daten abgedeckt werden, sind unter wasserbaulichen Aspekten zu überarbeiten.

Modellierungskonzept

Bewusst wurde in dieser Phase auf die detaillierte, hydrodynamische Modellierung der Stauräume (z.B. mit FLORIS [1]) verzichtet. Vielmehr orientiert sich die Durchflussberechnung weitgehend an einem bereits vorhandenen Volumenbilanzmodell der Ennskraft. Hier

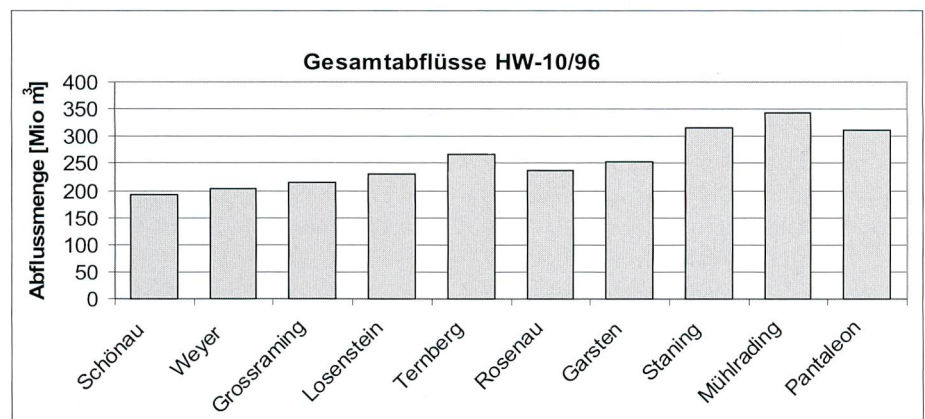


Bild 2. Vergleich der Durchflusssummen in den 10 Staustufen.

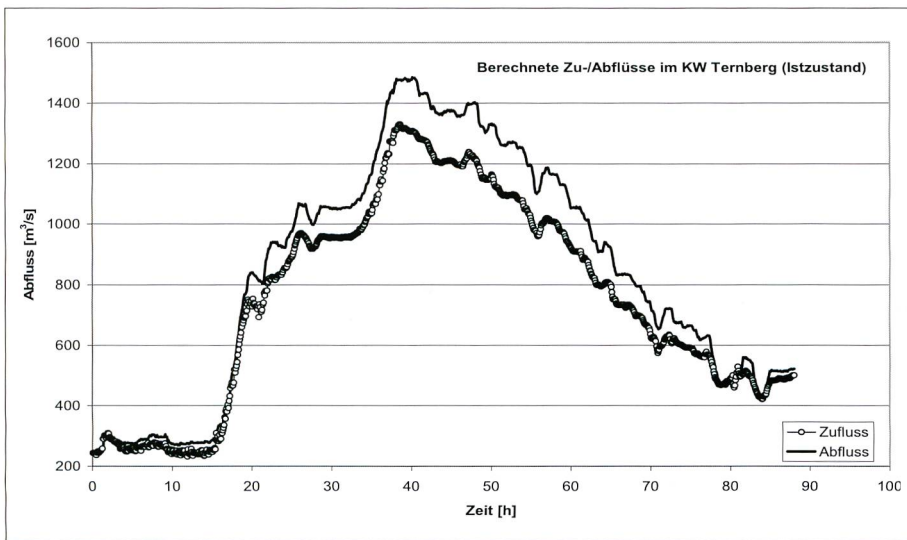


Bild 3. Vergleich der berechneten Zu- und Abflüsse im Kraftwerk Ternberg für HW-10/96. Direkte Simulation auf Grundlage der existierenden Wehrkennlinien (Istzustand).

werden zunächst die Volumenbeiträge des Oberliegigers, der Zwischenzubringer und der Stauraumänderung mit Hilfe teils vereinfachender Ansätze ermittelt und aufsummiert. Ein Vergleich mit den vom Prozessrechner der Kraftwerke ausgegebenen Durchflussmengen, die sich anhand der Wehr- und Maschinenkennlinien sowie der stetig aufgezeichneten Fallhöhen und Stellgrößen errechnen, quantifiziert abschliessend den Bilanzfehler der Modellrechnungen.

Das Berechnungsverfahren setzt sich aus verschiedenen Modellkomponenten (z.B. Staurauminhaltsmodell, Wehrdurchflussmodell, Turbinendurchflussmodell usw.) zusammen, die jeweils eigene Modellannahmen beherbergen. Jede dieser Annahmen wird durch ein oder mehrere meist ungenau bekannte Eingabeparameter repräsentiert (z.B. Staurauminhaltlinien, Wehrabflusskurven, Wichtungsfaktoren usw.), was entsprechende *Modellfehler* zur Folge hat. Ferner gehen Betriebsdaten ein, die ihrerseits direkt (Wasserspiegel, Wehrstellungen) oder indirekt (Pegelabflüsse) *Messfehler* enthalten.

Der hier gewählte Ansatz versucht nun die Durchflussberechnung mit Hilfe eines *inversen* Modellierungskonzeptes zu optimieren. Im Gegensatz zum *Direkten Problem*, wo ein Modellzustand (z.B. das Abflussregime) in Funktion der unabhängigen Eingabeparameter (Modellparameter) berechnet wird, werden hierbei die Modellparameter als abhängige Variable in Funktion eines (z.T. gemessenen) Sollzustandes behandelt. Dabei müssen die oben angesprochenen Mess- und Modellfehler berücksichtigt werden, was zu einer statistischen Betrachtung des *Inversen Problems* führt. Basierend auf der *Maximum-Likelihood-Schätztheorie* wird eine Zielfunktion formuliert, die zu minimieren ist. Durch wiederholtes Lösen des direkten Pro-

blems werden die Modellparameter iterativ so lange verbessert, bis die Summe der Abweichungen zwischen Rechnung und Sollzustand minimal wird. Aus Plausibilitätsgründen werden dabei auch die Vorkenntnisse der veränderlichen Modellparameter (z.B. die Werte aus Modellversuchen) berücksichtigt.

Bilanzmodell

Die Mengenbilanz der Zu- und Abflüsse im Stauraum n wird wiedergegeben durch die Kontinuitätsgleichung

$$\hat{Q}_{ZU,n} + \hat{Q}_{SZ,n} + \frac{d\hat{V}_n}{dt} - \hat{Q}_{AB,n} = 0 \quad (1)$$

- mit
- $\hat{Q}_{AB,n} = \hat{Q}_{T,n} + \hat{Q}_{W,n}$
 - und
 - $\hat{Q}_{ZU,n}$ – Zufluss vom Oberliegiger
 - $\hat{Q}_{SZ,n}$ – Zufluss aus Seitenzuflüssen/Zwischenzubringern
 - $\hat{Q}_{T,n}$ – Turbinendurchfluss
 - $\hat{Q}_{W,n}$ – Wehrdurchfluss
 - \hat{V}_n – im Stauraum gespeicherte Wassermenge

Der Zusatz « $\hat{\ }$ » indiziert dabei die wirklichen (aber unbekannt) Abflussmengen, deren Berechnung aufgrund der verschiedenen Fehlerquellen nur näherungsweise möglich ist. Somit entstehen bei der Bilanzierung der modellierten, zeitdiskreten Mengen im OW-Querschnitt einer Staustufe Restfehler (Residuen) der Form

$$r_{Q,n}^i = Q_{ZU,n}^i + Q_{SZ,n}^i + \frac{\Delta V_n^i}{\Delta t} - Q_{AB,n}^i \quad (2)$$

Dabei bezeichnet der Index n die Staustufen Weyer ($n = 1$) bis St. Pantaleon (N) der Ennskraft-Staukette.

Da auf eine detaillierte Beschreibung der Einzelkomponenten des Bilanzmodells [2] an dieser Stelle verzichtet werden muss, sei das Verfahren exemplarisch anhand der Wehrdurchflüsse erläutert. Der totale Wehrdurchfluss wird gebildet über die Einzel-

durchflüsse der N_W Wehrfelder. Zum Teil sind hier kombinierte Abflusskurven (Grundschütz, Oberschütz, Klappe usw.) zu berücksichtigen.

$$Q_{W,n}^i = \sum_{i=1}^{N_{W,n}} (Q_{W_i}^i) \quad (3)$$

- mit
- $Q_{W_i}^i = c_{W_i} \cdot Q_{W_i}^i$ – modellierter Einzeldurchfluss für Wehrfeld i
 - $Q_{W_i}^i = f_{W_i}(\tilde{h}_{OW}^i, \tilde{h}_{UW}^i, \tilde{S}_{W_i}^i)$ – Einzeldurchfluss gemäss Abflusskurve für Wehrfeld i
 - $\tilde{S}_{W_i}^i$ – Wehrstellung (Betriebsdaten)
 - \tilde{h}_{OW}^i – Oberwasserspiegel (Betriebsdaten)
 - \tilde{h}_{UW}^i – Unterwasserspiegel (Betriebsdaten)
 - c_{W_i} – Korrekturfunktion (Modellparameter)

Um innerhalb des inversen Verfahrens die Eingabedaten variabel zu halten, ist es notwendig, die Fehlerquellen der entsprechenden Komponenten mathematisch zu erfassen. Bei einigen Termen, welche Einzelparameter zur Berücksichtigung gewisser konzeptueller Annahmen beinhalten (z.B. die Gebietsfaktoren der Seitenzuflüsse usw.), ist dies bereits gegeben. Sind komplexere Eingabedaten (z.B. Kennlinienschar der Wehre) zu berücksichtigen, müssen zusätzliche Korrekturansätze eingeführt werden. Für die oben genannten Wehrdurchflussbeziehungen f_{W_i} können beispielsweise die implementierten Kurven mittels der quadratischen Korrekturfunktionen c_{W_i} verändert werden. Um ebenso die Schlüsselkurven der Zwischenzubringer in das Optimierungskonzept einzubinden, werden deren Messdaten mittels Polynomfunktionen approximiert. Die resultierenden Polynomkoeffizienten können anschliessend auf einfache Weise als abhängige Parameter behandelt werden.

Zielfunktion

Durch Anwendung der Maximum-Likelihood-Schätztheorie auf Gl. 3 lässt sich abschliessend eine Zielfunktion herleiten [3], welche äquivalent ist mit der Quadratsumme der gewichteten Abweichungen zwischen Modellrechnung und Sollzustand:

$$Z = \sum_n Z_{Q,n} + \lambda_{ZP} \sum_n Z_{ZP,n} + \lambda_{UW} \sum_n Z_{UW,n} + \sum_j \lambda_{p,j} Z_{p,j} \quad (4)$$

- mit
- $Z_{Q,n} = r_{Q,n}^T \mathbf{W}_{Q,n} r_{Q,n}$
 - $Z_{ZP,n} = r_{ZP,n}^T \mathbf{W}_{ZP,n} r_{ZP,n}$
 - $Z_{p,j} = r_{p,j}^T \mathbf{W}_{p,j} r_{p,j}$
 - r_Q – Vektor der Bilanzfehler in den Knoten (Gl. 2)
 - $r_p = \mathbf{p} - \mathbf{p}^*$ – Vektor der Residuen zwischen Modellparametern und Vorkenntnissen
 - λ_i – Faktoren für die Wichtung der Zielfunktionskomponenten untereinander

Vektor \mathbf{p} bezeichnet einen Satz von N Modellparametern, \mathbf{p}^* bezeichnet die Vorkenntnisse der Modellparameter \mathbf{p} , wie sie beispielsweise aus Messungen oder Modellversuchen verfügbar sind. Die diagonalen Wichtungsmatrizen \mathbf{W} berücksichtigen die

Fehlerstruktur der Residuen. Sie ermöglichen eine zeitliche (und örtliche) Wichtung der Residuen für Perioden (oder Durchflussknoten), wo die Messdaten als weniger zuverlässig beurteilt werden (siehe Anwendung).

Die Berücksichtigung der Vorkenntnisse im Optimierungsverfahren stellt als so genanntes Plausibilitätskriterium sicher, dass die errechneten Parameter sich innerhalb einer Spannweite physikalisch sinnvoller Grössen bewegen, indem Abweichungen vom ursprünglichen Wert «bestraft» werden. Die Zielfunktion (4) ist schliesslich hinsichtlich der Modellparameter \mathbf{p} zu minimieren. Der resultierende Parametersatz maximiert die Wahrscheinlichkeit, mit der das zugrunde gelegte Modell den Sollzustand reproduziert. Die Minimierung der Zielfunktion (4) stellt ein nichtlineares Optimierungsproblem vom Typ «Least-Squares» dar. Für dessen Lösung wird ein Marquardt-Levenberg-Algorithmus angewendet, der sich in der inversen Modellierung häufig bewährt hat. Eine ausführliche Beschreibung der statistischen und mathematischen Grundlagen des Verfahrens ist zu finden in [4].

Anwendung

Erste Aufgabe einer inversen Modellierung ist die Parametrisierung des Modells, d.h. die veränderlichen Modellparameter zu definieren. Das vorgestellte Konzept bietet hier die Möglichkeit, sämtliche Inputdaten des Modells mit Korrekturparametern zu versehen. Durch Parametrisierung der Abflusskurven der mehr als 60 Wehrgänge unter Einführung der erwähnten Korrekturfunktionen lassen sich mehrere hundert abhängige Parameter formulieren. Die eigentliche Kalibrierung erfolgt dann in mehreren Etappen anhand eines historischen Ereignisses, wobei zunächst mit Hilfe einiger weniger Parameter die offensichtlichen Fehler der Durchflussberechnung korrigiert werden (siehe KW Ternberg, Bild 3). Die zunehmende Verfeinerung der Parametrisierung ermöglicht anschliessend eine sukzessive Verbesserung des Bilanzfehlers in sämtlichen Kraftwerken, sodass sich eine plausible und konsistente Abflussbilanz über alle Staustufen mit den minimalen Abweichungen zu den bestehenden Kennlinien ergibt. Ein Vergleich der resultierenden Zu- und Abflüsse wiederum für KW Ternberg zeigt Bild 4. Hier ist anzumerken, dass während der 15-stündigen Anfangsperiode ausschliesslich Turbinenbetrieb gefahren wurde; die Wehrparameter haben hier keinen Einfluss. Solche Bereiche lassen sich bequem mittels der oben erwähnten zeitlichen Wichtung behandeln. Mit Faktor $w = 0$ versehen, finden die Residuen dieser Periode in der Zielfunktion keine Berücksichtigung.

Im bisher für die Kalibrierung verwendeten Hochwasser HW-10/96 ist nur ein Teil der betrieblich möglichen Öffnungskonstellationen der Wehrverschlüsse aufgetreten. Um hier einen möglichst weiten Betriebsbereich abzudecken, wurde anschliessend die Kennlinienkorrektur anhand mehrerer Hochwässer gleichzeitig vorgenommen (HW-10/96, -04/98, -05/99, -01/00, -03/00). Hierdurch wird die Plausibilität und Eindeutigkeit der ermittelten Abflusskurven weiter verbessert. Die Kalibrierung auf Basis mehrerer Hochwässer gelingt durch einfaches «Aneinanderhängen» der Zeitreihen, wobei in der Zielfunktion jeweils die Übergangsperioden nicht berücksichtigt werden (Wichtungsfaktoren).

Abflusskurven

Die automatische Kalibrierung mit Hilfe des vorgestellten, inversen Bilanzmodells ver-

ändert die Abflusskurven vor allem unter dem Gesichtspunkt der Wasserbilanz, sodass sich konsistente Abflussbedingungen über die gesamte Staukette einstellen. Bedingt können zwar wasserbauliche Aspekte durch eine geschickte Wahl der Wehrparameter berücksichtigt werden (z.B. Klappen). Auch das oben erwähnte Plausibilitätskriterium verhindert eine allzu starke Veränderung der Parameter. Dennoch kann es vorkommen, dass die errechneten Wehrkennlinien zum Teil unrealistische Verläufe aufweisen oder auch Wehrkennlinienbereiche, für die keine Betriebsdaten vorhanden sind, unerwünscht verändert werden. In diesen Fällen bedarf es einer manuellen Nachbesserung der Wehrkennlinien.

Auf Grund der unterschiedlichen Typen von Verschlussorganen müssen die Kurven hier individuell betrachtet werden. Folgende Schritte wurden durchgeführt: (a)

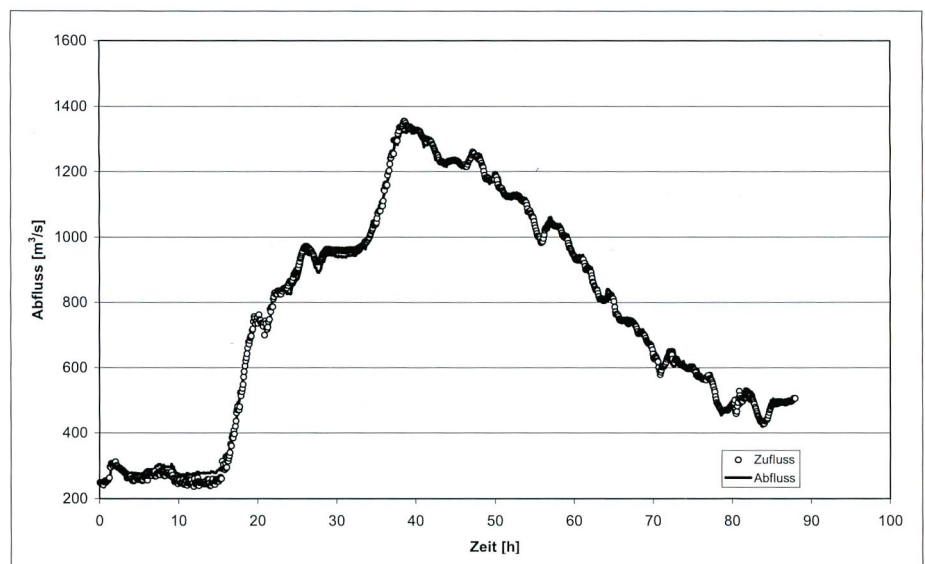


Bild 4. Vergleich berechneter Zu- und Abflüsse im Kraftwerk Ternberg für HW-10/96 (kalibrierter Zustand, vergleiche auch Istzustand, Bild 3).

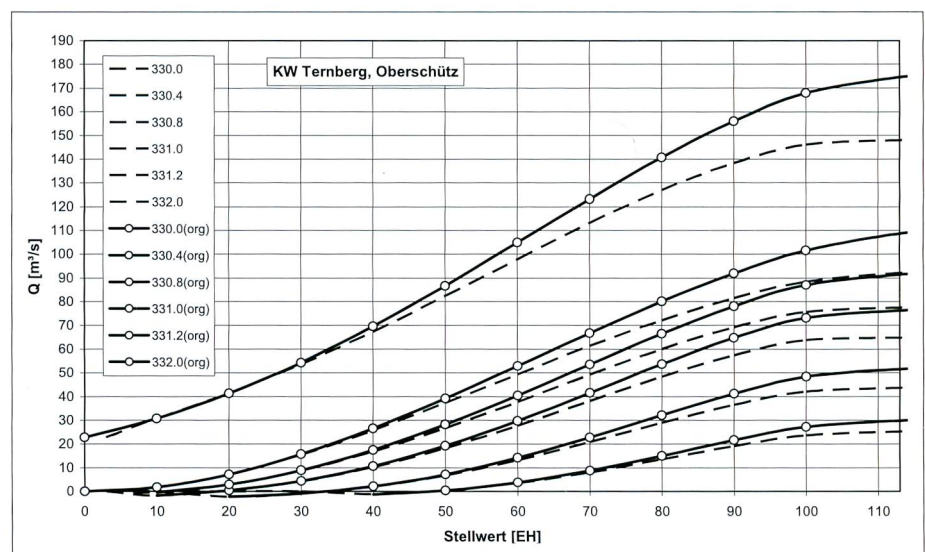


Bild 5. Vergleich berechneter (gestrichelt) und originaler Abflusskurven für Oberschütz Ternberg.

Rückrechnung von Durchflussbeiwerten bzw. Überfallbeiwerten (μ -Werte) für alle Unter- und Haken-Oberschützen, sowohl für die ursprünglichen Kennlinien als auch für die neuen aus der Kalibrierung ermittelten Kurven. (b) Glättung der Übergänge zwischen kalibrierten und originalen μ -Wert-Verläufen in Bereichen, wo keine Betriebsdaten verfügbar sind. Dieses Vorgehen anhand von μ -Werten (bezogen auf die Überfallhöhe bzw. Schützenöffnung) hat den Vorteil, dass die gleiche Charakteristik für alle resultierenden Abflusskurven eines Verschlussorganes sichergestellt ist (z.B. bei Hakenschützen den exakt parallel verschobenen Verlauf). (c) Abschliessend wurden zusätzlich die Ergebnisse aus vorhandenen Modellversuchen eingearbeitet – dies speziell für Unterschützen, bei denen ein Austauschen möglich ist.

Bis auf wenige Ausnahmen ergaben sich nur geringfügige Unterschiede zu den Kalibrierungsergebnissen. Ein Beispiel für die errechneten Kennlinienänderungen ist in Bild 5 dargestellt.

Validierung

Unter *Modellvalidierung* versteht man den Gültigkeitsnachweis der errechneten Modellparameter auf der Grundlage *unabhängiger Daten*, d.h., unter Bedingungen, die nicht schon während der Kalibrierung des Modells verwendet wurden. Für das vorliegende Projekt bot ein aktuelles Hochwasser der Enns im März 2002 eine solche (willkommene) Gelegenheit. Hierzu wurde das Ereignis auf Grundlage der oben ermittelten Wehrkennlinien über die gesamte Staukette durchgerechnet, ohne erneut die Parameter zu verändern (direkter Rechenlauf).

Bis auf wenige Ausnahmen, wo auf Grund eines Revisionszustandes oder Gerätedefektes die Bilanzfehler direkt zuzuordnen sind, kann eine ausgezeichnete Übereinstimmung in den Bilanzknoten ausgewiesen werden. Bild 6 zeigt wiederum am Beispiel Ternberg den Vergleich zwischen errechneten Zu- und Abflüssen. Für die bevorstehende Implementierung der neuen Wehrkennlinien in den Prozessrechnern der Kraftwerke erbringt dieses Validierungsergebnis den noch benötigten Vertrauensbeweis.

Zusammenfassung und Schussfolgerung

Es wurde ein inverses Verfahren vorgestellt, das die Korrektur von Wehrdurchflusskurven einer Staukette anhand vorhandener Hochwasserdaten ermöglicht. Auf Grundlage eines einfachen Bilanzmodells werden die parametrisierten Wehrkennlinien zusammen mit weiteren relevanten Parametern iterativ verändert, bis die Bilanz der Zu- und Abflüsse

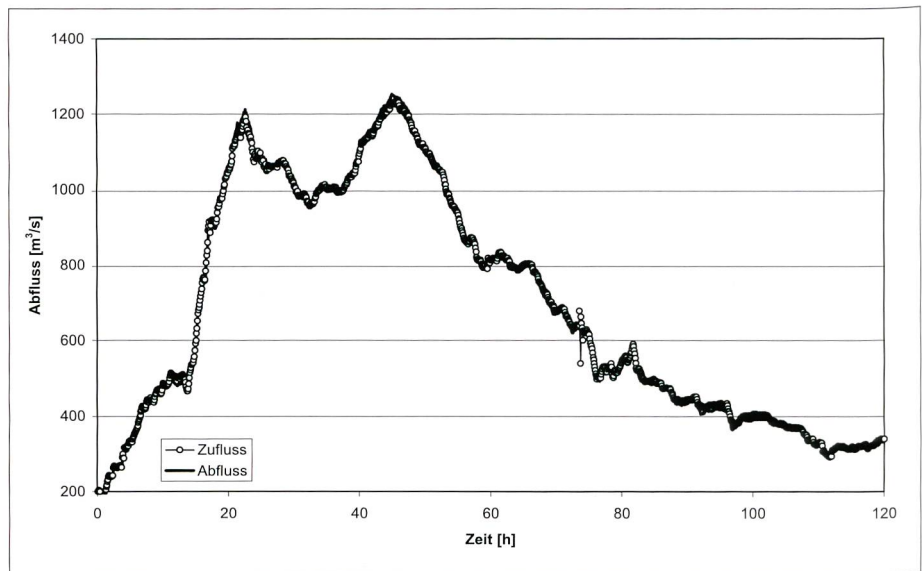


Bild 6. Vergleich der Zu- und Abflüsse im Kraftwerk Ternberg für HW-03/02. Direkte Simulation auf Grundlage der kalibrierten Parameter (Validierung). Abweichungen sind kaum wahrnehmbar.

in allen Knoten der Staukette minimal wird. Die gewählte statistische Formulierung erlaubt hierbei die Schätzung der optimalen Modellparameter auf Grundlage der gemessenen Betriebsdaten unter Berücksichtigung von Mess- und Modellfehlern.

Im Rahmen der Anwendung des Verfahrens auf die 10-stufige Staukette der Ennskraftwerke wurden zunächst die Kennlinien der mehr als 60 Wehrgänge mit Hilfe von Korrekturfunktionen parametrisiert, wodurch sich mehrere hundert abhängige Parameter formulieren lassen. Deren modellgestützte Optimierung für eine Reihe von historischen Hochwasserereignissen ergibt eine plausible und konsistente Abflussbilanz über alle Staufufen mit den minimalen Abweichungen zu den bestehenden Kennlinien.

Die abschliessende Plausibilitätskontrolle der resultierenden Abflusskurven aus wasserbaulicher Sicht zeigt, dass nur in wenigen Ausnahmefällen manuelle Nachbearbeitung notwendig ist – und dann vor allem in solchen Betriebsbereichen, welche durch die analysierten Hochwasserdaten nicht erfasst werden.

Grundsätzlich lässt sich das vorgestellte inverse Verfahren auf sämtliche Parameter eines Abflussmodells anwenden (z.B. Turbinenkennlinien, Rauigkeitsparameter, Verlustbeiwerte usw.). Allerdings ist dann – vor allem bei geringeren Abflüssen, wo die Retention grösseren Einfluss hat – die Simulation der Stauraumdynamik durch ein voll hydrodynamisches Modell zu ersetzen.

Dieser Beitrag ist ein Nachdruck des gleichnamigen Vortrags zum Symposium «Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau» vom 7. bis 9. Oktober 2002 in Zürich.

Referenzen

- [1] FLORIS (1992) – Ein hydrodynamisches Modell zur Berechnung instationärer Abflüsse in offenen Gerinnen, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- [2] U. Kuhlmann, Bilanzmodell Enns (2000), Ennskraftwerke AG / TK Consult AG, Steyr/Zürich.
- [3] Carrera, J. und S.P. Neuman (1986), Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum Likelihood Method incorporating prior information, *Water Resources Research*, Vol. 22(2), 199–210.
- [4] U. Kuhlmann (1992), Inverse Modellierung in geklüfteten Grundwasserleitern, *Mitteilungen Nr. 120*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.

Anschrift der Verfasser

Dr. Ulrich Kuhlmann, TK Consult AG, Siewerdtstrasse 7, CH-8050 Zürich,

kuhlmann@tkconsult.ch

DI Gerhard Zarfl, Ennskraftwerke AG, Resthofstrasse 2, Postfach 17, A-4403 Steyr,

ZarflG@verbund.at