

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Nestmann, Franz; Theobald, Stephan**

## **Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette am Beispiel von Rhein und Neckar**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102783>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Nestmann, Franz; Theobald, Stephan (1994): Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette am Beispiel von Rhein und Neckar. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 71. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 1-14.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette am Beispiel von Rhein und Neckar**

Numerical model for control and regulation of barrages in a sequence  
of cascades exemplified by projects on the Rhine and Neckar

Modèle numérique pour la commande et la régulation d'une séquence de barrage à  
l'exemple des ouvrages construits sur le Rhin et le Neckar

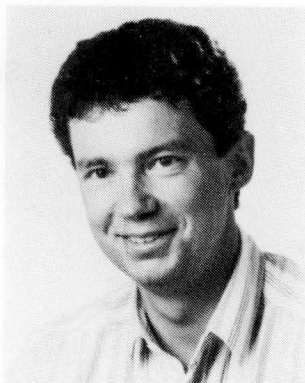
*Математическая модель управления и регулирования каскад  
гидроузлов на примере рек Рейн и Неккар*



Franz Nestmann, Dr.-Ing., Ltd. Baudirektor, Abteilungsleiter  
in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Geboren 1951; Studium des Bauingenieurwesens an der  
Universität Karlsruhe 1972 - 1977. Wiss. Angestellter in  
der Universität 1978 - 1986. Seit 1986 Referatsleiter in der  
BAW Karlsruhe. Seit 1990 Leiter der Abteilung Wasserbau/  
Hydraulik.

Berufung an die Universität Karlsruhe zum ordentlichen  
Professor für das Gebiet Wasserbau im März 1994.



Stephan Theobald, Diplom-Ingenieur.

Geboren 1964; Studium des Bauingenieurwesens an der  
Universität Karlsruhe 1984 - 1990.

Seit 1990 wissenschaftlicher Angestellter in der Bundesan-  
stalt für Wasserbau (BAW).

### **Inhaltsangabe**

Die Automatisierung von Staustufenketten gewinnt immer mehr an Bedeutung. In diesem ersten Bericht werden der prinzipielle Aufbau und Einsatz eines numerischen Verfahrens vorgestellt, womit die Parametrierung für den automatisierten Betrieb einer Staustufenkette vorbereitet wird. Mit den gewonnenen Parametern erfolgt danach die Voreinstellung der Großausführung. Dies geschieht unter Berücksichtigung der verschiedenen Interessen aus Schifffahrt, Energieerzeugung und Hochwasserschutz.

### **Summary**

The automation of barrages in a sequence of cascades is of increasing importance. This first report introduces the principles and applications of a numerical method used for preparing the parametrization of such an automated control of a sequence of barrages. The resulting parameters then serve as input for developing the prototype, also taking account of the various interests of navigation, energy production and flood protection.

## Résumé

L'automatisation de séquences de barrage est un domaine qui acquiert une importance croissante. Dans ce premier rapport sont introduits les principes et les conditions d'application pour un système numérique. L'objectif est tout d'abord de parvenir à déterminer les paramètres permettant d'assurer la commande de régulation d'une séquence de barrage. Par l'élaboration de ces paramètres, il est alors possible de procéder à certains ajustements en tenant compte des différents intérêts intervenant au niveau de la navigation, de la production d'énergie et de la prévention contre les inondations.

## АННОТАЦИЯ

*Вопрос автоматизации работы каскад гидроузлов приобретает все больше значения. В этой первой статье по теме представляется построение и применение математического метода, при помощи которого подготавливаются параметры автоматизированной работы каскад гидроузлов. На основе полученных параметров будет начата подготовка исполнения проекта в крупном масштабе. Это будет обеспечено с учетом интересов судоходства, энергетики и защиты от паводка.*

## INHALT

	Seite
1 Einleitung	3
2 Anwendung des HN-Modells am Beispiel des Hochrheins	4
3 Erweiterung des HN-Modells durch die Regelung/Steuerung	6
4 Anwendung des numerischen Gesamtmodells am Beispiel des Neckars	10
4.1 Beispiel einer Regelung	10
4.2 Beispiel einer Regelung/Steuerung	12
5 Zusammenfassung	13
Liste der verwendeten Symbole	13
Literatur	13

## 1 Einleitung

Ein Teil der Bundeswasserstraßen in der Bundesrepublik Deutschland ist staugeregelt. Hier hat die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes besonders auf die Erfüllung ihrer originären Aufgaben zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu achten, da es durch den Betrieb der Staustufen zu einer künstlichen Beeinflussung von Abfluß und Wasserstand kommt. Aber auch die Interessen der Kraftwerksbetreiber sind von großer Bedeutung, da an den Bundeswasserstraßen und anderen Flüssen, insbesondere in Süddeutschland, die regenerative Energiequelle Wasserkraft intensiv genutzt wird. Der Betrieb von mehreren Staustufen hintereinander in Form einer Staustufenkette kann zu extremen Strömungsvorgängen führen, so wie dies in Bild 1 am Pegel Raunheim, Main-km 12,2 (14.03.83) deutlich wird. Binnen 24 Stunden wurden Abflußveränderungen von 20 m<sup>3</sup>/s bis 190 m<sup>3</sup>/s registriert, deren besondere Größe dem Betrieb der Kontrollbauwerke zuzuordnen ist.

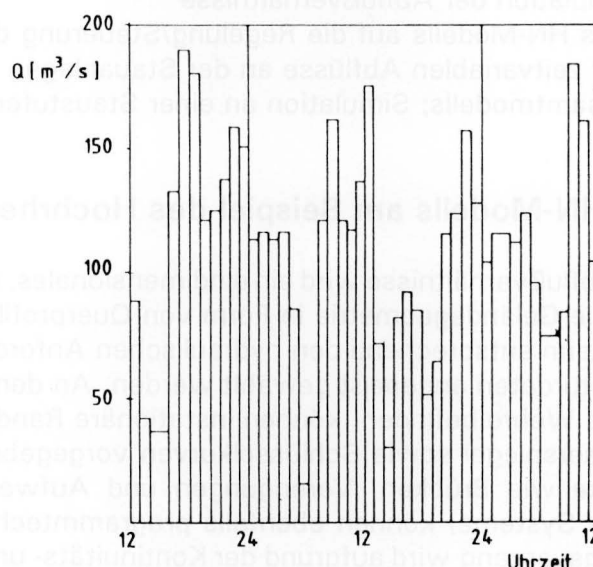


Bild 1 Abflußschwankungen am Pegel Raunheim, Main-km 12,2; 14.03.1983

In der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden derzeit numerische und experimentelle Untersuchungen zur Regelung von Wasserstand und Abfluß an staugeregelten Flüssen durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten ist es, grundlegende Erkenntnisse über das Systemverhalten geregelter Staustufen und Staustufenketten zu gewinnen. Aufgrund der Modelluntersuchungen sollen Kriterien zur Auslegung von Automatisierungssystemen erarbeitet werden, mit denen eine bestmögliche Flußstauregelung einer Staustufenkette unter Einbeziehung der nichtlinearen Systemdynamik des Abflußgeschehens in einer Stauhaltung erreicht werden soll.

Insbesondere ist zu beachten, daß sich eine Regelungsstrategie an folgenden, oft konträren Anforderungen orientiert:

- Erfüllung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt
- Nutzung der regenerativen Energiequelle Wasserkraft
- Erfüllung der Kriterien des Hochwasserschutzes
- Erhalt der Vielfalt von Strömung und Wasserständen
- Berücksichtigung des Brauch- und Nutzwasserbedarfs der Industrie.

Die genannten Zielvorgaben sind bei einer rechnerorientierten Steuerung einer Staustufenkette bei gleichzeitigem Erhalt einer möglichst großen Betriebssicherheit zu erfüllen. Die-

sem steht das komplexe, stark instationäre und räumlich verteilte Abflußverhalten in den Stauräumen sowie ein je nach Wasserdargebot und Verfügbarkeit unterschiedlicher Staustufenbetrieb mit wechselnden Abflüssen über Turbinen, Wehre und temporär über Schleusen gegenüber.

Die wesentlichen Einflüsse auf das Abflußgeschehen sind

- Betrieb der Schleusen für die Schifffahrt
- Schwellbetrieb bei der Energieerzeugung
- Entnahmen bzw. Zuflüsse
- Niederschläge, Schneeschmelze.

Die Behandlung der Problemstellung geschieht in drei Schritten:

Phase 1: Erstellung eines hydrodynamisch-numerischen Modells (HN-Modell) für jede Stauhaltung zur Simulation der Abflußverhältnisse

Phase 2: Erweiterung des HN-Modells auf die Regelung/Steuerung der Kontrollbauwerke mit Angabe der zeitvariablen Abflüsse an der Stauanlage

Phase 3: Betrieb des Gesamtmodells; Simulation an einer Staustufenkette

## 2 Anwendung des HN-Modells am Beispiel des Hochrheins

Zur Quantifizierung der Abflußverhältnisse wird ein eindimensionales, instationäres HN-Modell eingesetzt, für das die Geländegeometrie in Form von Querprofilen diskretisiert wird. Der Abstand der Profile kann entsprechend den hydraulischen Anforderungen und den zur Verfügung stehenden Naturdaten angepaßt gewählt werden. An den Rändern, wo sich in der Regel Kraftwerke und Wehre befinden, können instationäre Randbedingungen der Zu- bzw. Abflüsse, der Wasserspiegel sowie Schlüsselkurven vorgegeben werden. Schütze, Wehre, Polder, Bauwerke wie Brücken, Verengungen und Aufweitungen, sowie Verzweigungen (vermaschte Systeme) können ebenfalls programmtechnisch berücksichtigt werden [2]. Der Strömungsvorgang wird aufgrund der Kontinuitäts- und Impulsgleichungen nach Saint Venant verifiziert. Die unabhängigen Variablen in diesem Gleichungssystem sind die Zeit- und die Ortskoordinate, die abhängigen Variablen sind  $Q(x, t)$  und  $A(x, t)$  bzw.  $y(x, t)$ .

Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt mittels eines impliziten Differenzenverfahrens, d.h. die Ableitungen in den Gleichungen werden durch Differenzenquotienten approximiert.

Unter der Annahme, daß alle Funktionen  $f(y, Q)$  der diskretisierten nicht linearen algebraischen Gleichungen für den Zeitschritt  $n$  bekannt und differenzierbar sind, kann jede dieser Funktionen für den Zeitschritt  $n + 1$  mit dem Taylorpolynom entwickelt werden. Für jedes Punktepaar erhält man 2 Gleichungen; für ein System mit  $n$  Berechnungspunkten folglich  $2n-2$  Gleichungen. Bei Hinzunahme von 2 an das Flußsystem gestellten Randbedingungen (Wasserstand, Durchfluß) wird das Gleichungssystem iterativ gelöst.

Die simultane Lösung des genannten Gleichungssystems erfolgt für jeden Zeitschritt nach der "Double-Sweep Technik".

In der Stauhaltung des Rheinkraftwerkes Säckingen wurden im Jahre 1992 von der BAW Naturuntersuchungen bei instationären Abflußvorgängen durchgeführt, vgl. Bild 2. An insgesamt 14 Meßstellen wurden simultan Wasserspiegel im Oberwasser der Stauhaltung bei Beaufschlagung von am Kraftwerk Säckingen ( $\Delta Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ ) erzeugten Schwall- und Sunkwellen gemessen. Diese Ergebnisse sah man als geeignet an, eine numerische Verifikation zum Testen des hydrodynamisch-numerischen Modells durchzuführen. Zuvor erfolgte die Rauheitseichung des mathematischen Modells aufgrund von Wasserspiegelfixierungen, die bei konstant gehaltenem Abfluß durchgeführt worden waren. In Bild 3 ist ein

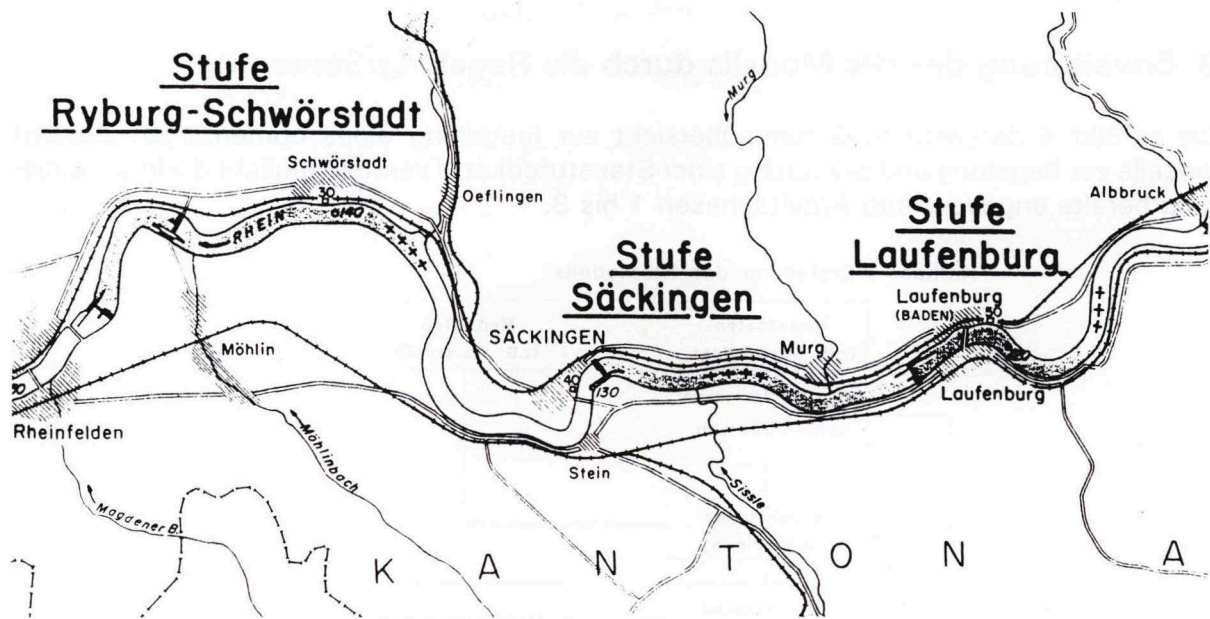


Bild 2 Lageplan der Stauhaltung Säckingen am Hochrhein

typisches Ergebnis einer instationären Verifikation gezeigt. Der hohe Grad der Übereinstimmung zwischen Natur und Modelluntersuchung bedarf keiner weiteren Vertiefung und zeigt die Eignung des HN-Modells.

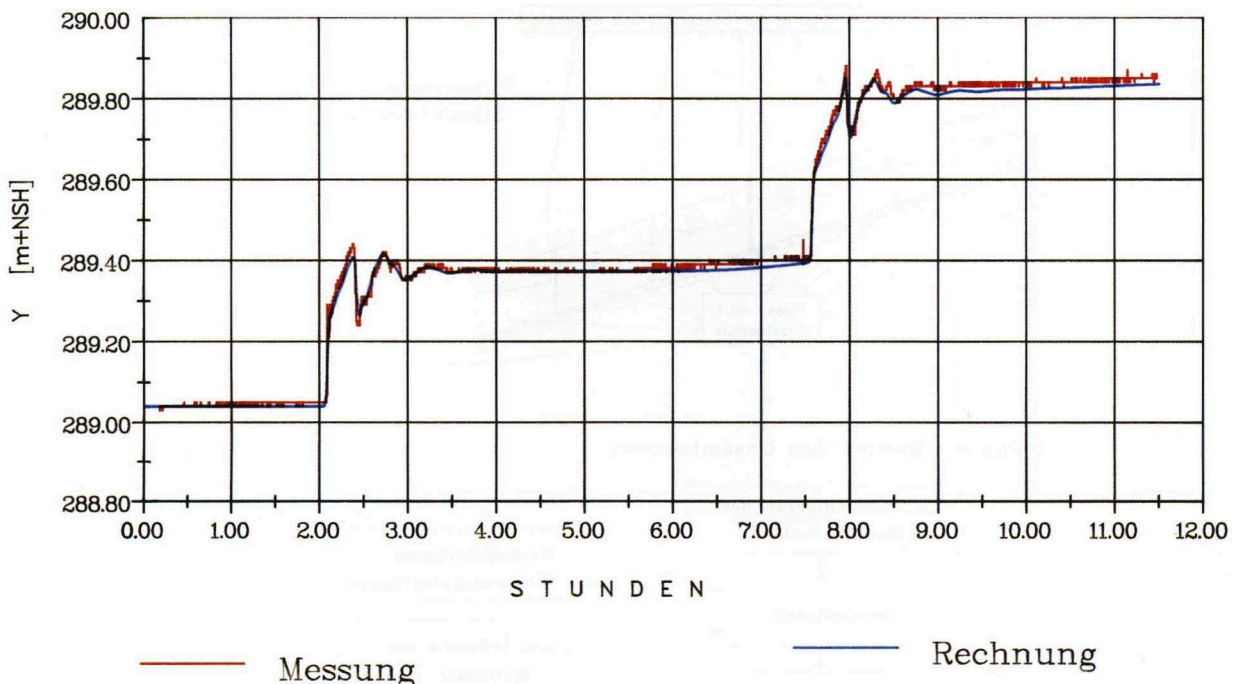


Bild 3 Wasserstandsganglinie am Rhein-km 127,424  
Vergleich: Messung - Rechnung

### 3 Erweiterung des HN-Modells durch die Regelung/Steuerung

Die in Bild 4 dargestellte Schemaübersicht zur Erstellung eines numerischen Gesamtmodells zur Regelung und Steuerung einer Staustufenkette veranschaulicht die in der Einleitung bereits angedeuteten Arbeitsphasen 1 bis 3.

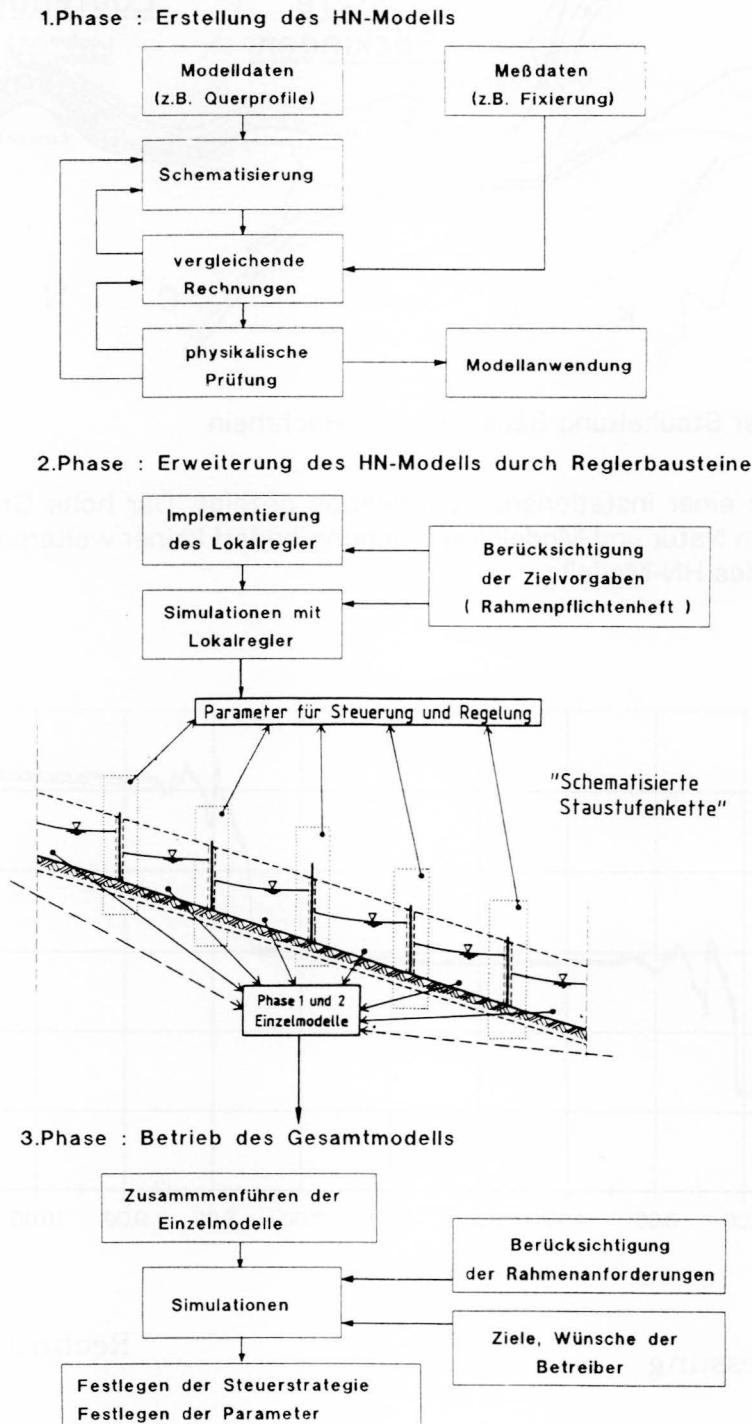


Bild 4 Ablaufplan zur Erstellung des numerischen Gesamtmodells

Um die Wechselwirkungen unter den Stauhaltungen bei instationärer Abflußbeaufschlagung und Betrieb der Kontrollorgane zu quantifizieren, bedarf es der Einbeziehung der Parameter infolge Staustufenbetriebs. Die Erfüllung zur Verifizierung der 2. Phase erweist sich

weitaus schwieriger als in Phase 1, da man davon auszugehen hat, daß jede Stauanlage für sich eine vielfältige Variation der Rand- bzw. Anfangsbedingungen durch den Betrieb von Wehranlagen, Kraftwerk und Schleusen darstellen kann.

Mit Hinweis auf Bild 5 wird unter einer Regelung ein Vorgang verstanden, bei dem eine Größe, die Regelgröße (Wasserstand), fortlaufend erfaßt wird und simultan mit einer anderen Größe, der Führungsgröße (einzuhaltendes Stauziel) verglichen wird. Abhängig vom Ergebnis dieses Vergleiches wird durch eine ständige Anpassung der Stellgröße (Stauraumabfluß) die Regelgröße im Rahmen einer zulässigen Abweichung der Führungsgröße angeglichen. Der sich daraus ergebende Regelungsvorgang befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf. Der Vorgang ist dynamisch, da die Regelgröße durch den Grad der Instationarität der Störgröße (Stauraumzufluß) entsprechend beeinflußt wird.

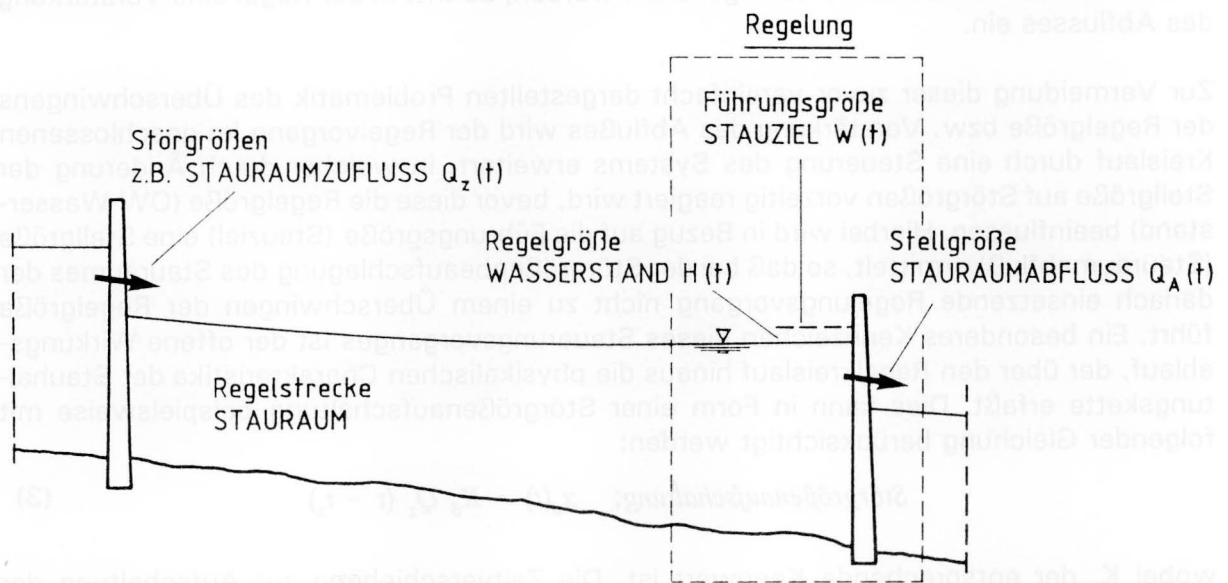


Bild 5 Technische Begriffe bei der Steuerung und Regelung von Stauhaltungen

Der oben beschriebene physikalische Ablauf wird mit verschiedenen Reglerarten, wie Proportional-, Integral-, Differential-Regler, oder einer Kombination dieser drei durchgeführt. Die Regler-Bezeichnungen bringen dabei zum Ausdruck, in welchem mathematischen Zusammenhang Regelgröße und Stellgröße stehen [8]. In der Praxis werden PI-Regler eingesetzt, Eingangsgrößen sind Wasserstand und Abfluß an der Stauanlage.

Es gilt mit  $x_a$  als Reglerausgang und  $x_e$  als Reglereingang folgender Zusammenhang:

$$\text{Proportionalanteil: } x_a(t) = K_p x_e(t) \quad (1)$$

$$\text{Integralanteil: } x_a(t) = K_I \int_0^t x_e(\tau) d\tau \quad (2)$$

wobei  $K_p$  der Proportionalitätsfaktor und  $K_I$  der Kennwert für den Integralanteil ist.



Im Regelkreis stellt der PI-Regler den sogenannten Führungsregler dar, welcher den Abflußsollwert vorgibt. Zur Realisierung des Istabflusses ( $Q_{\text{ist}} = Q_{\text{soll}}$ ) ist ein untergeordneter Abflußregler erforderlich, durch welchen die Stellbefehle für das gesamte Kontrollbauwerk abgegeben werden. Auf den Abflußregler wird im Rahmen dieses Berichtes nicht eingegangen, es werden nur Fragen zum Führungsregler behandelt.

Ohne vertieft auf die Physik der Regler einzugehen, ist es leicht verständlich, daß ein solcher Regelkreislauf nur so lange funktionieren kann, wie die Trägheit der Stellgrößendynamik (Kontrollbauwerke) und die verwendeten Regler den Änderungen der Störgrößen folgen können. Wird die Trägheit überfordert, so kann die Störgrößenbeaufschlagung des Systems zu einem Überschwingen der Regelgröße außerhalb der zulässigen Abweichung von der Führungsgröße führen.

Ist demgegenüber bei starken Zuflußschwankungen die Stellgrößendynamik entsprechend schnell und der Wasserstand kann gehalten werden, so tritt in der Regel eine Verstärkung des Abflusses ein.

Zur Vermeidung dieser zuvor vereinfacht dargestellten Problematik des Überschwingens der Regelgröße bzw. Verstärkung des Abflusses wird der Regelvorgang im geschlossenen Kreislauf durch eine Steuerung des Systems erweitert, in welcher durch Änderung der Stellgröße auf Störgrößen vorzeitig reagiert wird, bevor diese die Regelgröße (OW-Wasserstand) beeinflussen. Hierbei wird in Bezug auf die Führungsgröße (Stauziel) eine Stellgröße (Stauraumabfluß) ermittelt, so daß bei der Störgrößenbeaufschlagung des Stauraumes der danach einsetzende Regelungsvorgang nicht zu einem Überschwingen der Regelgröße führt. Ein besonderes Kennzeichen dieses Steuerungsvorganges ist der offene Wirkungsablauf, der über den Regelkreislauf hinaus die physikalischen Charakteristika der Stauhaltungskette erfaßt. Dies kann in Form einer Störgrößenaufschaltung beispielsweise mit folgender Gleichung berücksichtigt werden:

$$\text{Störgrößenaufschaltung: } x_a(t) = K_s Q_z (t - t_s) \quad (3)$$

wobei  $K_s$  der entsprechende Kennwert ist. Die Zeitverschiebung zur Aufschaltung der Störgröße wird mit  $t_s$  angegeben. Für einen PI-Regler mit Störgrößenaufschaltung gilt:

$$x_a(t) = K_p x_e(t) + K_I \int_0^t x_e(\tau) d\tau + K_s Q_z (t - t_s) \quad (4)$$

Das Zusammenwirken von Regelung im geschlossenen Kreislauf und Steuerung im offenen Wirkungsablauf wird, je nach Bedarf, kombiniert betrieben, wobei eine unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Anteile gemäß den Erfordernissen, die sich beispielsweise aus der Trägheit von einzelnen Staustufen ergeben, erfolgt. Bereits an dieser vereinfachten Erläuterung wird deutlich, daß die Quantifizierung einer Regelung und kombinierten Regelung und Steuerung einen überaus komplexen Vorgang darstellt.

Durch die Parametrierung erfolgt quasi eine Anpassung der Reglerdynamik an die physikalischen Gegebenheiten. Dabei werden durch Simulationen verschiedene Fallbeispiele, wie beispielsweise

- plötzliche Änderung des Zuflusses für verschiedene Grunddurchflüsse,
- allmähliche Veränderung des Zuflusses für verschiedene Grunddurchflüsse,
- Sollwertssprung,
- Schiffspassage (Störsignal aufgrund von Schiffspassagen am Pegel, Wellenbewegungen bis 0,3 m),
- Schleusungen oberstrom und/oder unterstrom,

## Neckarstrecke Mannheim – Plochingen

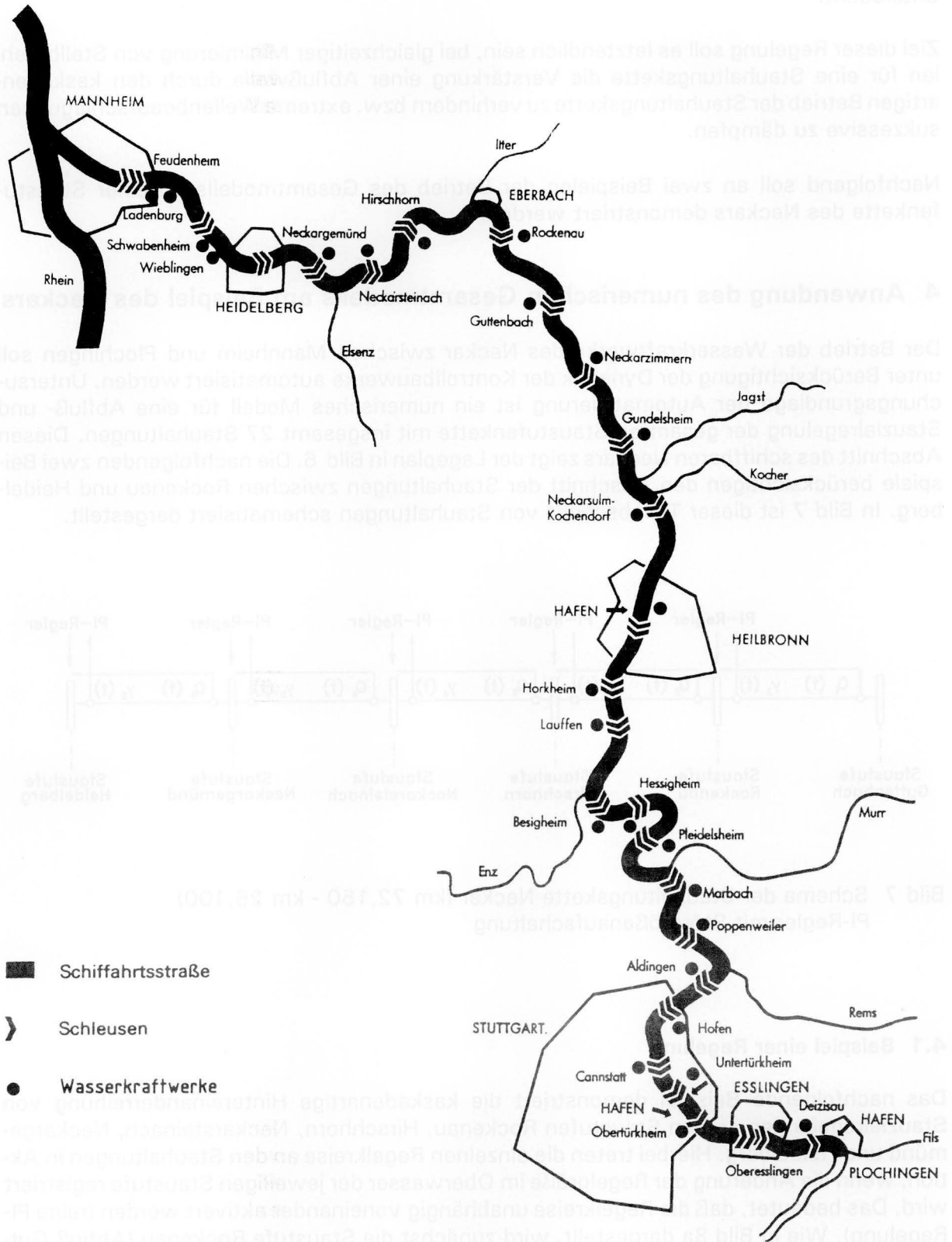


Bild 6 Neckarstrecke Mannheim-Plochingen

- Schnellschluß der Turbinen oberstrom/unterstrom,
- Kombination von Schleusung und Schiffspassagen,
- Durchgang eines Hochwassers, usw.

untersucht.

Ziel dieser Regelung soll es letztendlich sein, bei gleichzeitiger Minimierung von Stellbefehlen für eine Stauhaltungskette die Verstärkung einer Abflußwelle durch den kaskadenartigen Betrieb der Stauhaltungskette zu verhindern bzw. extreme Wellenbeaufschlagungen sukzessive zu dämpfen.

Nachfolgend soll an zwei Beispielen der Betrieb des Gesamtmodells an einer Staustufenkette des Neckars demonstriert werden.

#### 4 Anwendung des numerischen Gesamtmodells am Beispiel des Neckars

Der Betrieb der Wasserkraftwerke des Neckar zwischen Mannheim und Plochingen soll unter Berücksichtigung der Dynamik der Kontrollbauwerke automatisiert werden. Untersuchungsgrundlage der Automatisierung ist ein numerisches Modell für eine Abfluß- und Stauzielregelung der gesamten Staustufenkette mit insgesamt 27 Stauhaltungen. Diesen Abschnitt des schiffbaren Neckars zeigt der Lageplan in Bild 6. Die nachfolgenden zwei Beispiele berücksichtigen den Abschnitt der Stauhaltungen zwischen Rockenau und Heidelberg. In Bild 7 ist dieser Teilabschnitt von Stauhaltungen schematisiert dargestellt.

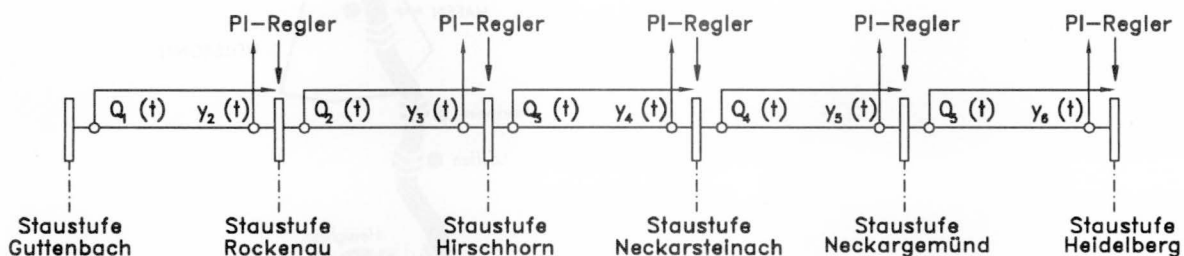
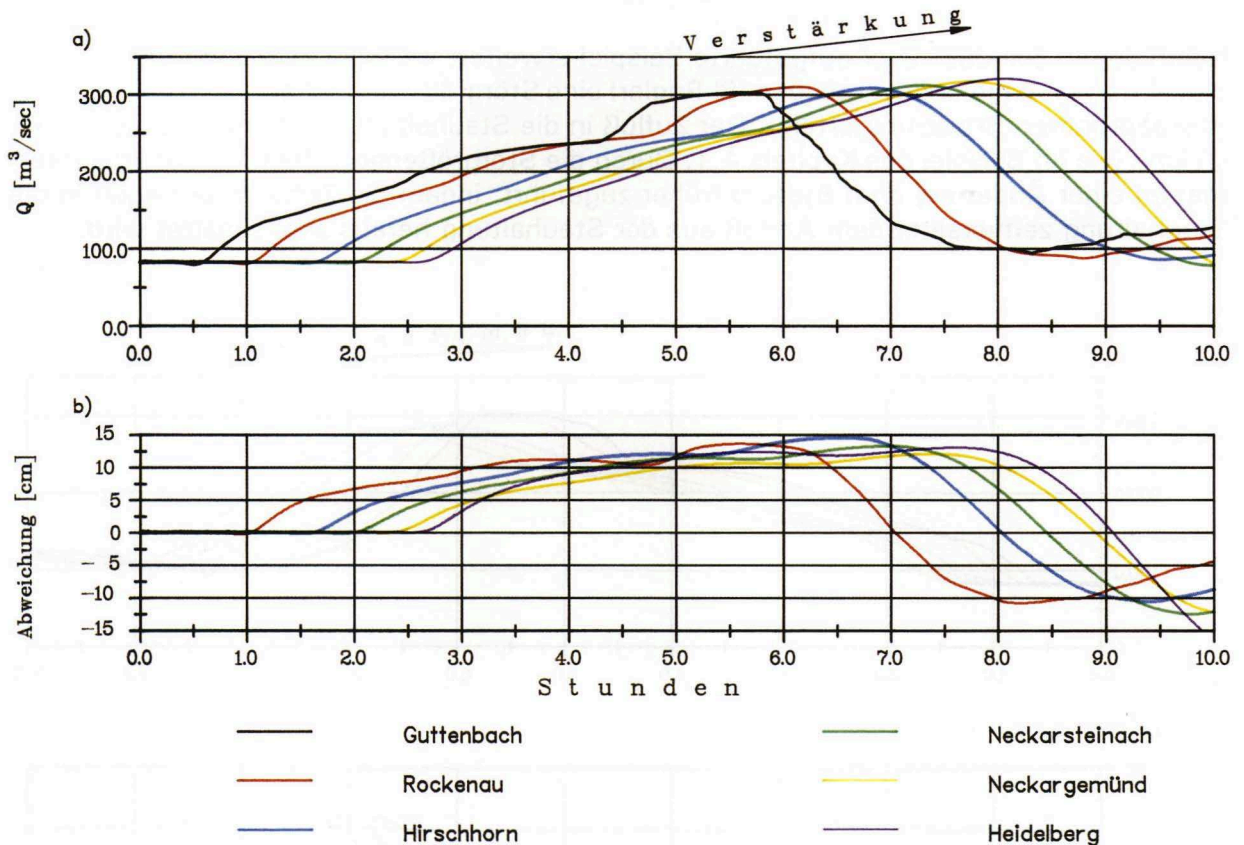


Bild 7 Schema der Stauhaltungskette Neckar (km 72,150 - km 26,100)  
PI-Regler mit Störgrößenaufschaltung

##### 4.1 Beispiel einer Regelung

Das nachfolgende Beispiel demonstriert die kaskadenartige Hintereinanderreihung von Stauzielregelungen an den Staustufen Rockenau, Hirschhorn, Neckarsteinach, Neckargemünd und Heidelberg. Hierbei treten die einzelnen Regelkreise an den Stauhaltungen in Aktion, wenn die Änderung der Regelgröße im Oberwasser der jeweiligen Staustufe registriert wird. Das bedeutet, daß die Regelkreise unabhängig voneinander aktiviert werden (reine PI-Regelung). Wie in Bild 8a dargestellt, wird zunächst die Staustufe Rockenau (Abfluß Guttenbach) durch eine Abflußänderung von über 200 m<sup>3</sup>/s innerhalb 5 Stunden beaufschlagt (kleine Hochwasserwelle vom 27./28.06.1990).



**Bild 8** Durchgang einer kleinen Hochwasserwelle; PI-Regler ohne Störgrößenaufschaltung  
a) Abflüsse an den Stauanlagen  
b) Abweichungen der OW-Pegel vom Stauziel

Da die Regelung erst bei Änderung des Oberwasserstandes (Eintreffen der Welle an der Stauanlage) reagiert, zeigt sich die Überforderung des Reglers mit den Zielen

- Einhalten Stauziel - Stauzielregelung
- Vergleichsmäßigung des Abflusses - Abflußregelung.

Der dargestellte Verlauf des Abflusses in Rockenau (Bild 8a) und die Änderung des Wasserspiegels im OW der Stauhaltung Rockenau (Bild 8b) demonstrieren die vorangestellte Problematik als möglichen Kompromiß zwischen Stauziel- und Abflußregelung.

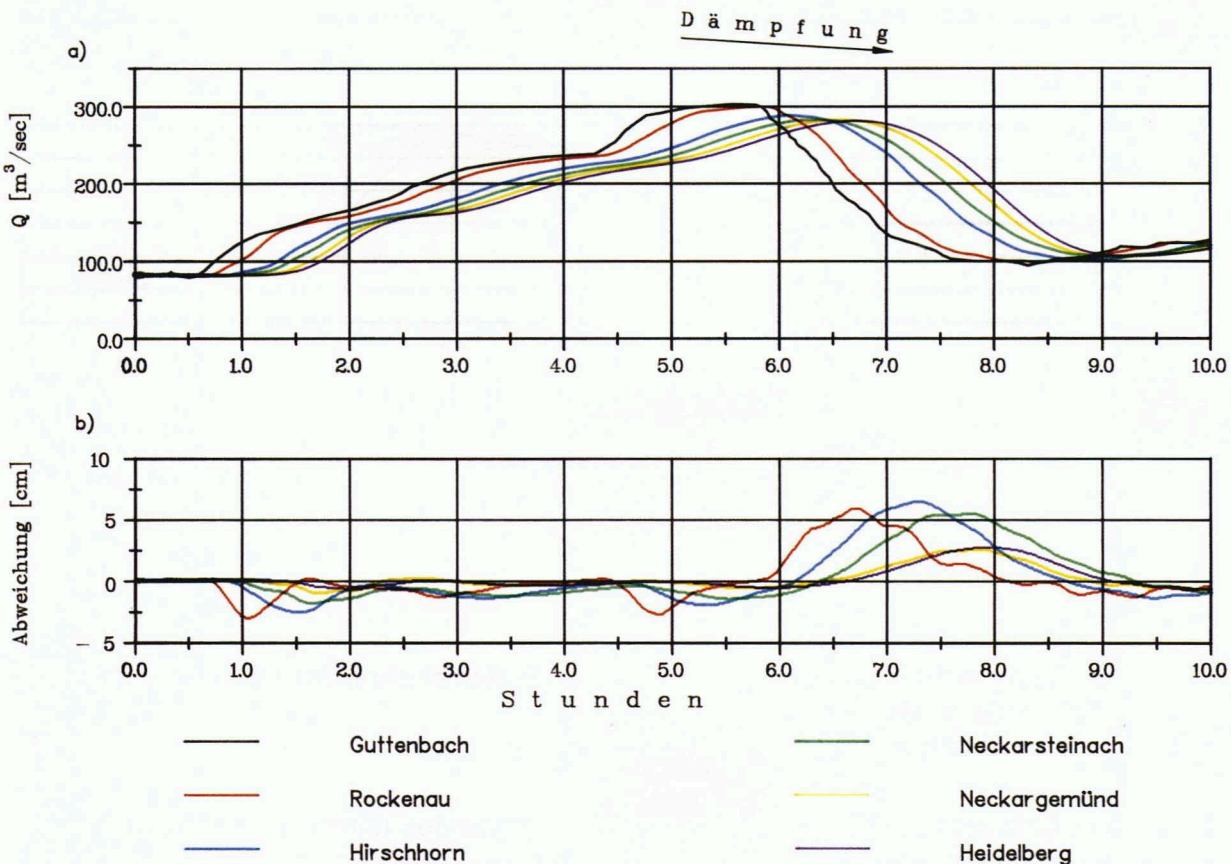
Je besser das Stauziel eingehalten wird, desto eher tritt eine Abflußverstärkung ein. Infolge dieser Abflußbeaufschlagung kommt es temporär zu einer Verstärkung des Abflusses im Unterwasser Rockenau, in die Stauhaltung Hirschhorn hinein. Der Abfluß an der Stauhaltung Hirschhorn wird demgegenüber wiederum verstärkt und führt in gleicher Weise zu einer Verstärkung des Abflusses aus der Stauhaltung Neckarsteinach.

Wie das Bild 8a eindrucksvoll demonstriert, wird die Beaufschlagung der Stauhaltung Rockenau sukzessive an den weiteren Stauhaltungen verstärkt. In Bild 8b sind die Abweichungen des OW-Pegel vom Stauziel der betreffenden Stauhaltung über die Zeit aufgetragen.

Das Beispiel demonstriert, daß eine voneinander unabhängige Regelung der Stauhaltungen eine nicht tolerierbare Verstärkung der Abflußdynamik in allen weiteren Stauhaltungen oder größere Abweichungen vom Stauziel zur Folge hat.

## 4.2 Beispiel einer Regelung/Steuerung

Nachfolgend soll das zuvor aufgeführte Beispiel erweitert werden, wobei in Ergänzung zu den einzelnen Regelungsvorgängen (PI-Regler) eine Störgrößenaufschaltung in der Art einer übergeordneten Steuerung erfolgt. Der Zufluß in die Stauhaltung Rockenau ist hierbei der gleiche wie im Beispiel des Kapitels 4.1. Durch die Störgrößenaufschaltung wird die Information einer Änderung dem System früher zugeführt, indem die Zuflußinformation in die Stauhaltung zeitversetzt dem Abfluß aus der Stauhaltung heraus zugeschaltet wird.



**Bild 9** Durchgang einer kleinen Hochwasserwelle; PI-Regler mit Störgrößenaufschaltung  
 a) Abflüsse an den Stauanlagen  
 b) Abweichungen der OW-Pegel vom Stauziel

Der Vergleich des daraus resultierenden Verlaufes der Abflüsse in Bild 9a und der Wasserpiegel im Oberwasser der Staustufen in Bild 9b mit denjenigen in Bild 8 demonstriert die physikalische Wirkung der Störgrößenaufschaltung. Bei einer Schwankungsbreite von ca.  $\pm 5$  cm des OW-Standes (Bild 9b) wird der Abfluß aus der Stauhaltung Rockenau in einer nahezu unveränderten Form der Ganglinie in die nächste Stauhaltung weitergegeben. Dabei ist auch, wie Bild 9a demonstriert, bereits eine geringfügige Dämpfung des Maximum gegenüber dem Zufluß der Stauhaltung Rockenau erreicht.

In den nachfolgenden Staustufen erfolgt insgesamt eine Dämpfung der Abflußganglinien, womit gezeigt ist, daß die übergeordnete Störgrößenaufschaltung in der Lage ist, eine Aufsteilung der Welle zu verhindern und ggf. einen Dämpfungsvorgang zu bewirken.

Eine weitere Alternative neben der Störgrößenaufschaltung auf den Durchfluß ist das Prinzip der Nachlaufregelung, d.h. das Stauziel wird entsprechend einer gewünschten Bereitstellung von Volumen temporär geändert. In diesem Bericht wird diese Möglichkeit nicht weiter erörtert.

## 5 Zusammenfassung

Mit dem voran beschriebenen numerischen Gesamtmodell ist ein Instrumentarium geschaffen, die Automatisierung der Steuerung von Staustufen und die dazugehörige Parametrierung begleitend zu untersuchen. Das Verfahren erlaubt, durch vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten den verschiedenen Interessen und Nutzungsanforderungen in geeigneter Weise zu entsprechen.

### Liste der verwendeten Symbole

$x_s(t)$	Ausgang des Reglers zur Zeit $t$ , z.B. Abfluß
$x_e(t)$	Eingang des Reglers zur Zeit $t$ , z.B. Differenz zwischen Ist- und Sollwasserstand
$K_p$	Parameter für Proportionalanteil
$K_i$	Parameter für Integralanteil
$K_s$	Parameter für Störgrößenaufschaltung
$Q_z$	Zufluß in die Stauhaltung
$t_s$	Zeitverschiebung zur Aufschaltung der Störgröße

### Literatur

- [1] Bordiec, N.: "Le réglage des niveaux sur les cours d'eau canalisés. L'exemple du Rhône en aval de Lyon." Permanent International Association of Navigation Congresses, Bulletin No. 57
- [2] Cunge, Holly, Verwey: "Practical aspects of computational river hydraulics." Pitman Publishing 1980
- [3] Horn, H., Zielke, W.: "Das dynamische Verhalten von Flußstauhaltungen." Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, Bericht Nr. 29, 1973
- [4] Fäh, R., Kühne, A.: "Numerische Simulation automatischer Stauregelungen bei Laufwasserkraftwerken." Sonderdruck aus "Wasser, Energie, Luft", Heft 5/6, 1987
- [5] Leutenegger, H.J.: "Regelungstechnik in der Praxis - am Beispiel Laufwasserkraftwerk." Bull. SEV/VSE 76, 11, 1985
- [6] Merz: "Untersuchungen zur Steuerung von Stauhaltungen des Mains im Hinblick auf eine Vergleichsmäßigung des Durchflusses." Diplomarbeit, BAW Karlsruhe und Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (TH), 1988

- [7] Neumüller, A., Bernhauer, W.: "Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken mit automatischen Verfahren", Wasserwirtschaft, Heft 9/1976
- [8] Unbehauen: "Regelungstechnik I, Lineare kontinuierliche Regelsysteme", Vieweg 1992
- [9] Vischer, D.: "Die stetige Regelung eines Flüssigkeitsstandes", Technische Rundschau, Nr. 53, 54, 1970