

Conference Paper, Published Version

**Zinkhahn, Markus; Simons, Franz**

## **Regelung von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderungen bei der Umsetzung von Bemessungsvorgaben**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110555>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zinkhahn, Markus; Simons, Franz (2021): Regelung von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderungen bei der Umsetzung von Bemessungsvorgaben. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Die Variabilität natürlicher Prozesse – Eine Herausforderung bei der Planung von Fischaufstiegsanlagen. 7. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen 18. und 19. November 2021 Onlineveranstaltung. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 75-80.

### **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.



## **Regelung von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderungen bei der Umsetzung von Bemessungsvorgaben**

Markus Zinkhahn, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dr.-Ing. Franz Simons, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Ein wichtiges Element, um die kleinräumige Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) zu gewährleisten, ist die Leitströmung, die als hydraulische Information den aufwandernden Fischen helfen soll, den Einstieg in die FAA zu finden (DWA 2014). In der Empfehlung der BAW zur Bemessung der Leitströmung an Standorten mit Wasserkraftnutzung werden die Anforderungen für Bundeswasserstraßen konkretisiert (BAW 2019). Um die benötigte Leitströmungslänge zu erreichen, ist häufig eine Dotation am Einstieg notwendig. Außerdem kann es an einigen Standorten erforderlich sein, neben dem kraftwerksnahen Haupteinstieg weitere Einstiege anzubieten, z. B. einen abgerückten Einstieg für schwimmschwächere Arten. Für deren Betrieb sind ebenfalls Dotationseinleitungen nötig.

Die hydraulischen Bedingungen in FAA werden durch die Variabilität natürlicher Prozesse, insbesondere Änderungen des Unter- und Oberwasserstandes, beeinflusst. Dies bedeutet, dass die Dotationsdurchflüsse entsprechend den sich ändernden Randbedingungen angepasst werden müssen um die gestellten Anforderungen, wie z. B. die Einhaltung der fischökologisch begründeten maximalen Fließgeschwindigkeiten oder eine ausreichende Leitströmungslänge, zu erfüllen. Für einen effizienten Betrieb muss diese Anpassung automatisiert erfolgen können. Zusätzlich wird die Regelung bzw. Steuerung der Anlage durch deren Komplexität unter vielfältigen standort- und planungsspezifischen Randbedingungen zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Dazu zählen bspw. verschiedene Trassenkonfigurationen, die Art der Dotationszuleitung per Freispiegelkanal oder Rohrleitung und unterschiedliche Laufzeiten durch variierende Kanallängen.

In einem Forschungsprojekt zur automatisierten FAA-Regelung (AFR) erarbeitet die BAW im Auftrag des Wasserstraßenneubauamts Aschaffenburg Regelungs- und Steuerungskonzepte am Beispiel der Fischaufstiegsanlagen mit Forschungsanteil der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV). Diese in Schlitzpassbauweise geplanten Anlagen sind von ihrer Anordnung relativ komplex und die Fließgeschwindigkeiten müssen in den Einstiegsschlitzten als Randbedingung für die geplanten Felduntersuchungen zur Ausprägung der Leitströmung und zur Notwendigkeit von zusätzlichen Einstiegen möglichst konstant gehalten werden. Die Ergebnisse des Projekts sollen dann auf FAA ohne Forschungsanteil übertragen werden, um auch dort eine gute kleinräumige Auffindbarkeit zu gewährleisten.

Der vorliegende Beitrag soll die regelungstechnischen Grundlagen und die Untersuchungsmethodik der BAW erläutern. Anhand eines Beispiels wird der Einfluss verschiedener Störfaktoren auf die hydraulischen Bedingungen im Einstiegsschlitz bei unterschiedlichen Regelungskonzepten dargestellt.

## Grundlagen und Einflussgrößen

Die Fließgeschwindigkeit  $v$  im Einstiegsschlitz ist eine der zentralen Größen für die Leitströmungslänge. Jedoch ist deren messtechnische Erfassung wegen der zeitlichen und räumlichen Heterogenität der Strömungsprozesse im Schlitz schwierig. Daher wird als Stellvertretergröße die Differenz der Wasserspiegellagen im Einstiegsbecken und im Unterwasser  $\Delta h$  genutzt, die mit der Fließgeschwindigkeit über den funktionalen Zusammenhang  $v \approx \sqrt{2g \Delta h}$  verbunden ist (z. B. DWA 2014). Da der Unterwasserstand nicht beeinflussbar ist, muss mittels Dotation der Wasserstand im Einstiegsbecken verändert werden, um eine Änderung von  $\Delta h$  und damit der Fließgeschwindigkeit zu bewirken. Die Veränderung des Wasserstands im Einstiegsbecken, kann mit folgender Bilanzgleichung vereinfachend beschrieben werden:

$$\frac{dW_{\text{Becken}}}{dt} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{aus}} + Q_{\text{Dot}}}{\text{Fläche}_{\text{Becken}}} \quad (1)$$

wobei  $Q_{\text{in}}$  bzw.  $Q_{\text{aus}}$  die Volumenströme in bzw. aus dem Becken und  $Q_{\text{Dot}}$  den Dotationsdurchfluss in das Becken beschreibt. Sämtliche äußeren Bedingungen, die auf diese Größen wirken, haben folglich Einfluss auf die Geschwindigkeit am Einstiegsschlitz. Mögliche Einflussgrößen sind:

- Unterwasserschwankungen: Diese haben wegen ihrer großen Variabilität häufig den größten Einfluss auf  $\Delta h$  und  $Q_{\text{aus}}$  am Einstiegsschlitz.
- Oberwasserschwankungen: Diese wirken auf den Betriebsdurchfluss ( $Q_B$ ) der Anlage, also  $Q_{\text{in}}$ , und je nach Art der Dotationswasserentnahme aus dem Oberwasser auch auf  $Q_{\text{Dot}}$ .
- Abweichungen im Betriebsdurchfluss zwischen Bemessung und Realität: Diese können bis zu 15% betragen (Sokoray-Varga et al. 2020).
- Abweichung von der angestrebten Aufteilung der Betriebsdurchflüsse in einem Verteilbecken durch verschiedene hydraulische Gesamtwiderstände der Einstiegsstränge oder unterschiedliche Unterwasserstände an den Einstiegen.
- Weitere Zuflüsse in die FAA durch Dotationseinleitungen z. B. in das Verteilbecken.
- Die Genauigkeit des Regelorgans für das gewünschte  $Q_{\text{Dot}}$ .
- Betriebliche Aspekte wie beispielsweise Verklausungen.

## Automatisierte FAA Regelung

Die Automatisierung der Dotation in die FAA kann durch eine Steuerung oder Regelung oder eine Kombination aus beidem erfolgen. Im Folgenden werden die Möglichkeiten kurz vorgestellt.

### UW-Steuerung:

In Bild 1 ist ein schematischer Längsschnitt durch ein Einstiegsbecken dargestellt. Durch den oberstromigen Schlitz fließt der Betriebsdurchfluss der FAA  $Q_B$  zu. Aus dem unterstromigen Einstiegsschlitz fließt der zur Leitströmungsbildung notwendige Leitdurchfluss  $Q_L$ . In das Einstiegsbecken mündet die Dotationseinleitung. Mit Hilfe eines Pegels wird der Unterwasserstand (Führungsgröße) gemessen, Anhand des Unterwasserstandes wird der Soll-Dotationsdurchfluss  $Q_{\text{Dot,soll}}$  gewählt, der z. B. aus einer Betriebskurve ermittelt wird und der durch ein Regelorgan (z. B. ein Schütz oder Schieber) abgeführt werden soll.  $Q_{\text{Dot,soll}}$  wird dabei aus

$$Q_{\text{Dot,soll}} = Q_{L,\text{Steuerung}}(UW) - Q_{B,\text{bem}} \quad (2)$$

berechnet. Darin ist  $Q_{B,bem}$  der bemessene Betriebsdurchfluss und  $Q_{L,Steuerung}(UW)$  der vom Unterwasserstand abhängige Leitdurchfluss. Deren Berechnung beruht, wie in der hydraulischen Bemessung der Anlage, auf Gleichungen die den Zusammenhang von Durchfluss und Fließtiefen beschreiben (z. B. DWA 2014, Sokoray-Varga et al. 2020). Abweichungen der tatsächlichen hydraulischen Bedingungen an der Anlage von den Bemessungsannahmen haben somit einen direkten Einfluss auf die Güte der Regelung. Da die Veränderung des Dotationsdurchflusses keinen Einfluss auf den Unterwasserstand der FAA hat, gibt es keine direkte Rückkopplung in dieser Berechnung und man spricht von einer Steuerung.

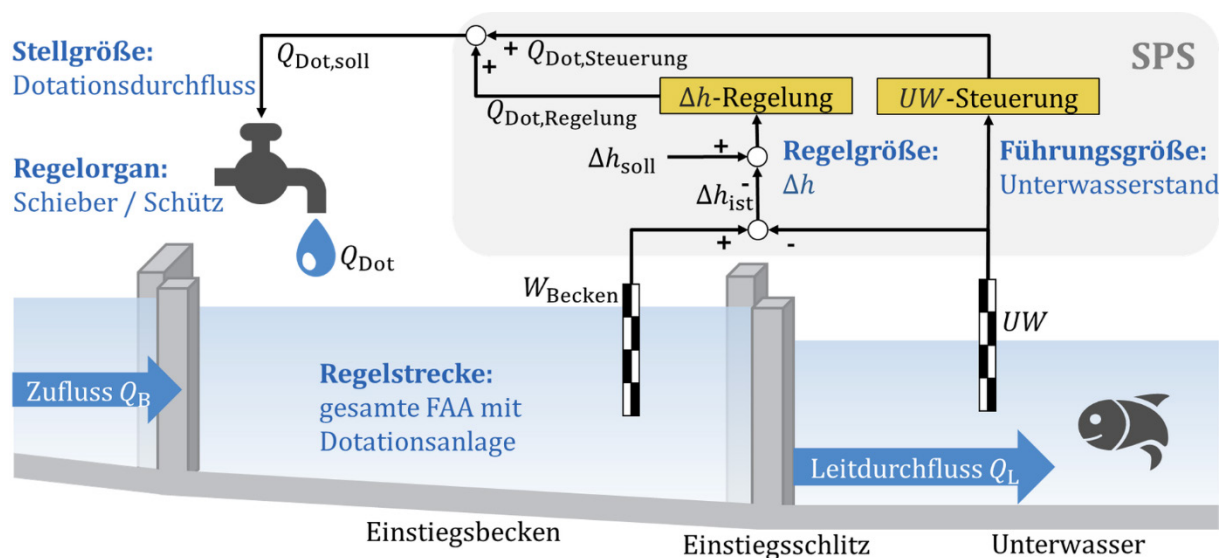


Bild 1: Schematische Darstellung des Regelkreises am Einstiegsbecken.

### $\Delta h$ -Regelung:

Die Wasserstände ober- und unterstrom des Einstiegschlitzes werden mit Hilfe von Pegeln gemessen und daraus die momentane Wasserspiegellagedifferenz  $\Delta h_{ist}$  berechnet. Dieser Istwert wird mit dem vorgegebenen Soll-Wert  $\Delta h_{soll}$  verglichen. Die Abweichung dient dem Regler als Eingangsgröße, der daraus einen Sollwert für den Dotationsdurchfluss berechnet. Dieser Soll-Durchfluss wird dann von einem Regelorgan, je nach Typ und technischer Spezifikation, mehr oder weniger schnell und genau umgesetzt. Der geänderte Durchfluss wirkt sich dann wiederum auf den Wasserstand im Einstiegsbecken aus, wodurch ein geschlossener Regelkreis entsteht. In der Regelungstechnik wird das  $\Delta h_{ist}$  als Regelgröße, der Dotationsdurchfluss als Stellgröße und der Schieber oder das Schütz als Regelorgan bezeichnet. Der Fischpass selbst und die Dotationsleitungen stellen die Regelstrecke dar.

Diese Art von Regelung kann beispielsweise durch einen sogenannten Proportional-Integral (PI)-Regler realisiert werden. Es handelt sich dabei um einen in der Regelungstechnik zum Standard gehörenden Regelalgorithmus (z. B. Lunze 2010). Seine Regeleigenschaften basieren auf zwei Parametern, dem Verstärkungsfaktor  $K_p$  und der Nachstellzeit  $T_i$ .

### Kombination von Steuerung und Regelung:

Eine Steuerung hat den Vorteil, dass sie immer stabil ist. Je nach Güte des der Steuerung zu Grunde liegenden Modells, lässt sich damit der Systemzustand präzise an die Führungsgröße anpassen. Allerdings können Störgrößen, die nicht in der Steuerung berücksichtigt sind, zu einer ungewollten Zustandsänderung führen. Das heißt, es müssen alle relevanten Störgrößen in ihrer Wirkweise auf die Zielgröße vorher bekannt sein und entsprechend in die Steuerung eingehen. Dies ist der große Unterschied zur Regelung, die durch ihren geschlossenen Regelkreis, in dem die Soll- mit der Ist-Größe verglichen wird, auf alle Störungen in der Regelgröße reagiert, ohne diese vorher zu kennen. Allerdings ist das Regelverhalten stark von der Parametrierung des Reglers abhängig und kann bei schlechter Parametrierung auch instabil werden.

Um das Wissen, das der UW-Steuerung zugrunde liegt zu nutzen und gleichzeitig die Auswirkung der oben genannten möglichen Störgrößen zu kompensieren, ohne sie vorher zu kennen und messtechnisch zu erfassen, ist eine Kombination aus Steuerung und Regelung denkbar. Dabei wird die Stellgröße  $Q_{\text{Dot,soll}}$  als Summe der berechneten Dotationsdurchflüsse aus Steuerung und Regelung gebildet:

$$Q_{\text{Dot,soll}} = Q_{\text{Dot,Steuerung}}(UW) + Q_{\text{Dot,Regelung}}(\Delta h_{\text{soll}}, \Delta h_{\text{ist}}) \quad (3)$$

Der Steuerungsanteil adressiert die häufig gewichtigste Störgröße, den Unterwasserstand, und der Regelungsanteil kompensiert alle anderen Störgrößeneinflüsse.

### **Untersuchungsmethodik - Modellbildung**

Für die Analyse der AFR müssen für alle Komponenten des Regelkreises Modelle entwickelt werden. Diese lassen sich grob in zwei Gruppen unterscheiden. Zu der ersten Gruppe gehören die Algorithmen die auf der sogenannten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) hinterlegt werden, d. h. auf der Hardware die an der Anlage arbeitet. Dort findet die Aufbereitung der Messdaten (z. B. Tiefpassfilterung um kleinskalige Schwankungen aus dem Messsignal herauszufiltern) und die darauf basierende eigentliche Steuerung bzw. Regelung zur Bildung der Stellgröße statt. In die zweite Gruppe gehören die physischen Komponenten der Anlage, also das Bauwerk als Regelstrecke und die Komponenten der technischen Ausrüstung, das Regelorgan und die Messeinrichtungen.

Die modelltechnische Umsetzung erfolgt in der Software MATLAB® & Simulink® der Firma MathWorks® analog der Vorgehensweise der BAW bei der Modellentwicklung für die automatisierte Abfluss- und Stauregelung (BAW 2012). Für die Hydraulik in der FAA wird ein instationärer eindimensionaler Ansatz auf Basis von Gl. 1 in Kombination mit der Durchflussformel für Schlitzpässe nach Sokoray-Varga et al. (2020) verwendet. Kanalartige Strecken können in Anlehnung an Abbott (1979) und Cunge (1980) mit einem Ansatz auf Basis der eindimensionalen Flachwassergleichungen berücksichtigt werden. Als Randbedingungen werden Ganglinien für den Ober- und Unterwasserstand vorgegeben. Das Ergebnis der hydraulischen Berechnung sind die Wasserstände in der Anlage. Das Regelorgan wird zunächst durch ein vereinfachtes Modell abgebildet, welches auf einer Totzeit zwischen den Stellbefehlen und einem Mindestverstellschritt beruht. Die SPS-seitigen Aufgaben, also Messwertfilterung und die Steuer- und Regelalgorithmen sind die Teile, die in ihrem Verhalten erprobt und bewertet werden sollen.

## Beispiel

Die Unterschiede in der Reaktion auf Störgrößeneinflüsse zwischen einer Steuerung (Gl. 2) und einer Kombination von Steuerung und Regelung (Gl. 3) sollen hier an einem vereinfachten Beispiel gezeigt werden. Grundlage für dieses Beispiel ist ein Schlitzpass mit 19 Becken und einem  $\Delta h_{\text{soll}}$  von 12 cm. Zur Ausbildung der Leitströmung ist die Weite des Einstiegsschlitzes 33 % größer als die der übrigen Schlitzte und es erfolgt eine Dotation in das Einstiegsbecken. Das Regelorgan arbeitet mit einem Mindestverstellschritt von 70 l, d. h. es wird erst eine Stellgrößenänderung durchgeführt, wenn das von der Steuerung oder Regelung geforderte  $Q_{\text{dot,soll}}$  sich um 70 l vom zuletzt eingestellten Dotationsdurchfluss unterscheidet. Außerdem weicht in dem Beispiel der tatsächliche Betriebsdurchfluss  $Q_B$  um 10 % von dem in der Steuerung angenommenen  $Q_{B,\text{bem}}$  ab.

Als Randbedingungen für die Störgrößen wurde ein Szenario angesetzt, bei dem der Unterwasserstand vom unteren Bemessungswasserstand nach 1 Stunde innerhalb von 10 Stunden linear um 1 m steigt und nach 2 Stunden in 10 Stunden wieder abfällt. Im gleichen Zeitraum sinkt der Oberwasserstand um 15 cm um steigt dann wieder an (Bild 2a), wobei die Steuerung auf den höheren Wasserstand bemessen ist.

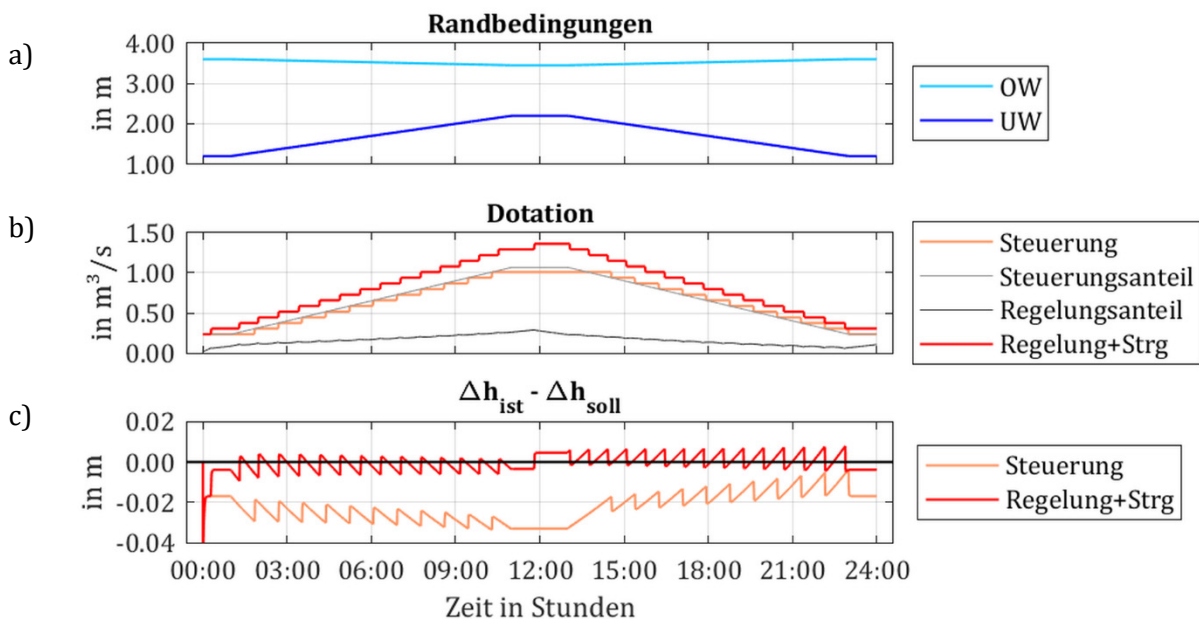


Bild 2: Beispiel einer Steuerung und einer Kombination von Regelung und Steuerung bei gegenläufig steigendem und fallenden Ober- und Unterwasserstand (a). b) Dotationsdurchfluss, wobei die Steuerung den Betriebsdurchfluss systematisch um 10 % überschätzt. c) Abweichung zwischen  $\Delta h_{\text{ist}}$  und  $\Delta h_{\text{soll}}$

Bild 2b zeigt die Dotation für die Steuerung und die Kombination von Regelung und Steuerung, sowie deren Anteile. In Bild 2c ist die Differenz zwischen  $\Delta h_{\text{ist}}$  und  $\Delta h_{\text{soll}}$  dargestellt. Im Falle der Steuerung liegt das  $\Delta h_{\text{ist}}$  durchgehend unter dem Sollwert, was daran liegt, dass die Steuerung den Betriebsdurchfluss überschätzt. Dies wird durch das fallende OW noch verstärkt, weil auch dies eine Reduktion des Betriebsdurchflusses zur Folge hat. Der Regelungsanteil (schwarze Linie in Bild 2b) hingegen reagiert auf das infolge der Überschätzung des Betriebsdurchflusses zu geringe

$\Delta h_{\text{ist}}$ . Auch der Einfluss des fallenden Oberwasserstandes wird durch die Regelung weitestgehend ausgeglichen.

## Fazit

Mit der Kombination von Steuerung und Regelung wurde ein Regelungskonzept vorgestellt, welches auf einem bekannten Zusammenhang zwischen Unterwasserschwankungen und Dotationsdurchfluss basiert und zugleich in der Lage ist, unvorhergesehene Störgrößeneinflüsse auszugleichen. Dadurch können die Wasserspiegeldifferenzen zwischen Einstiegsbecken und Unterwasser und somit die Fließgeschwindigkeiten im Einstieg weitestgehend konstant gehalten werden. Das ist für den FuE-Betrieb an den WSV-Anlagen mit Forschungsanteil von zentraler Bedeutung, um im angestrebten Zeitrahmen belastbare Ergebnisse zu erzielen. Das Konzept wird im Hinblick auf diese Anlagen weiter untersucht. Da der Anspruch an das Regelungskonzept und die benötigte technische Ausstattung sowie das Ausfallrisiko mit den Anforderungen an die Regelgüte steigen, muss abgewogen werden, ob die erarbeiteten Konzepte direkt auf FAA ohne Forschungsanteil übertragen werden sollen oder ob die Projektergebnisse für eine vereinfachte Lösung genutzt werden können.

## Literatur

- Abbot, M. B. (1979): Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free Surface Flow. Pitman Publishing, London.
- BAW (Hg.) (2012): BAWMitteilungen Nr. 96: Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102544>.
- BAW (Hg.) (2019): BAWEmpfehlung, Empfehlung für die Bemessung der Leitströmung von Fischauftiegsanlagen an Standorten mit Wasserkraftnutzung für den kraftwerksnahen Einstieg, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106982>.
- Cunge, J. A.; Holly, F. M.; Verwey, A. (1980): Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman Publishing Limited, London.
- DWA (2014): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hg.): Fischauftiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. In: DWA-Merkblätter, M 509 (korrigierte Fassung Februar 2016).
- Lunze, J. (2010): Regelungstechnik 1. 8. Aufl., Berlin, Springer.
- Sokoray-Varga, B.; Höger, V.; von Meltzer, J.; Prinz, F.; Weichert, R. (2020): Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 33-41.