

Numerische 3-D-Untersuchung der Leitströmung bei Fischaufstiegsanlagen am Beispiel des unteren Puhlstromwehres

Im Wasserbau gibt es zahlreiche anspruchsvolle Aufgabenstellungen, die eine 3-D-hydro-nummerische Strömungsmodellierung erfordern. Besonders bei der Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an bestehenden Querbauwerken kann eine 3-D-Untersuchung der Strömung sehr hilfreich sein. Mittels der numerischen Modellierung kann die Auffindbarkeit des Einstiegs in Abhängigkeit unterschiedlicher Strömungssituationen, optimiert werden. Für die benannte Wehranlage ist in Eigeninitiative ein Modell zur Untersuchung der Auffindbarkeit des Einstieges in die geplante Fischaufstiegsanlage erstellt worden. Es konnte gezeigt werden, wie die Konkurrenzströmung der Wehrüberfälle, turbulente Zonen oder Kurzschlussströmungen in abgewinkelten Becken die Lockströmung und deren Auffindbarkeit beeinflussen. Die Untersuchung zeigt auch, dass numerische 3-D-Simulationen ein geeignetes Mittel bei der Planung bzw. Optimierung von Fischaufstiegsanlagen ist.

Marcel Härtel und Markus Grünzner

1 Einleitung

Am Puhlstromwehr in Brandenburg ist geplant, die existierenden, baufälligen Fischaufstiegsanlagen (FAA) durch eine neue FAA zu ersetzen. Die geplante FAA wird in einem nur sehr schwer zugänglichen Bereich errichtet, der zudem ökologisch sehr sensibel ist. Für den Bau ist eine bauzeitliche Überführung des Puhlstromes erforderlich, da die Anlage nur von der linken Gewässerseite aus erreichbar ist. Das bedeutet, dass ggf. erforderliche Nachbesserungen der Fischaufstiegsanlage nach deren Fertigstellung nur mit erheblichem Aufwand durchführbar sind. Da die Konkurrenzströmungen der Wehranlage auch bei optimaler Anordnung des Einstieges gem. Anforderungen des DWA-Merkblattes M 509 [1] negative Auswirkungen auf die Auffindbarkeit des Einstieges in die FAA und damit der Funktionsfähigkeit haben kann, wurde die Einstiegsituation mittels 3-D-nummerischem Modell nachgebildet, um schon vor dem Bau und während der Planungsphase mögliche Schwachstellen der Konstruktion zu identifizieren und gegebenenfalls Optimierungsmaßnahmen ableiten zu können.

Kompakt

- Optimierung der Lockströmung bei unterschiedlichen Strömungssituationen an einem Wehr.
- 3-D-CFD-Simulation der Lockströmung bei unterschiedlichen Abflüssen und Betriebszuständen.
- Numerische Simulation als hilfreiches Werkzeug zur Planung und Optimierung wasserbaulicher Fragestellungen.

2 Das Puhlstromwehr

Das Untere Puhlstromwehr befindet sich etwa 1,5 km östlich der Ortslage Groß-Wasserburg und südlich der Ortslage Leibsch im Landkreis Dahme-Spreewald in Brandenburg. In unmittelbarer Nähe zum bestehenden Bauwerk sind ausschließlich Waldflächen vorhanden. Das Wehr befindet sich in einer leichten Gewässerkurve im Puhlstrom bei Gewässerkilometer 6+800 in einem ökologisch sehr sensiblen Bereich (FFH-Gebiet, SPA-Gebiet, Biosphärenreservat und Naturschutzgebiet). Das Wehr ist ein 1994 errichtetes Stahlbetonbauwerk mit zwei Wehrfeldern (Breite je 6,0 m) sowie einer bereits integrierten FAA (Schlitzpass, $B = 1,2$ m) und einer Kahnschleuse ($B = 4,0$ m). Die Gesamtbreite der Wehranlage beträgt etwa 28,0 m. Die Regulierung des Oberwasserstandes wird durch Heben und Senken der Einfachschütze ermöglicht. Der vorhandene Fischaufstieg umfasst zwei separate Anlagen, einen wehrintegrierten Schlitzpass und einen Schlitzpass im Umgehungsgerinne (Altarm). Beide Anlagen befinden sich in einem baulich sehr schlechten Zustand, sind hydraulisch überlastet und in ihrer Funktionsfähigkeit stark eingeschränkt. Hinsichtlich ihrer Dimensionierung gibt es große Abweichungen zu den Richtwerten des DWA-Merkblattes M 509 [1]. Des Weiteren ist die Einstiegsituation der Anlage im Umgehungsgerinne nicht optimal, da der Auslaufbereich des Gerinnes weit unterhalb des Wehres liegt (Sackgasseneffekt) und hier keine nennenswerte Leitströmung vorhanden ist. Aus diesen Gründen ist die ökologische Durchgängigkeit am Standort stark eingeschränkt.

Da eine Optimierung der bestehenden Anlagen nur in unzureichendem Maße möglich ist, wurde der Neubau einer FAA rechtsseitig des Wehres in Prallhanglage geplant. Die geplante FAA mündet direkt ins Unterwasser des Wehres. Bei der geplan-

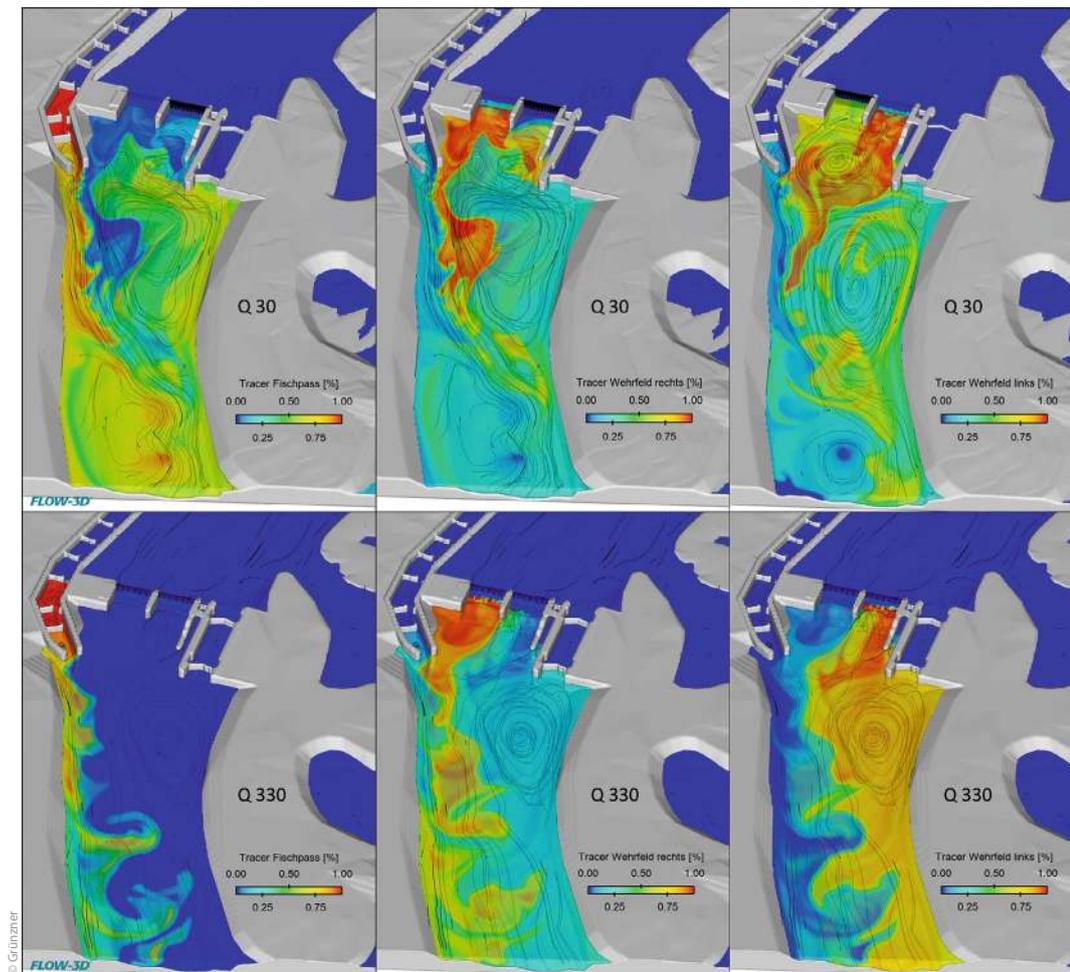


Bild 1: Lockstrom- und Wehr-Tracer für den Abfluss Q_{30} (obere Zeile) und den Abfluss Q_{330} (untere Zeile) bei Wehrüberströmung

ten FAA handelt es sich um einen Schlitzpass mit einer Gesamtlänge von 75,5 m. Die Dimensionierung der Beckengeometrie und der Schlitzbreite richtet sich nach den Vorgaben des technischen Regelwerkes DWA-Merkblatt M 509 [1] für den Bemessungsfisch Wels. Der Fischaufstieg soll in Spundwandbauweise ausgeführt und innen mit einer Betonvorsatzschale (Glatte Wandung) versehen werden. Die Trennwände, Leitwände (mit Abschrägung) und Umlenklöcke werden in bewehrtem Ort-beton hergestellt.

Die zwei bestehenden FAA werden anschließend außer Betrieb gesetzt.

3 Numerisches Modell

3.1 Software FLOW-3D

Die kommerzielle Software FLOW-3D ist eines der bekanntesten Simulationswerkzeuge für die Analyse dreidimensionaler Strömungen im Bereich Wasserbau. FLOW-3D löst die dreidimensionalen Navier-Stokes Gleichungen in einem kartesischen Gitter. FLOW-3D bietet dabei die Möglichkeit, Simulationen mit einem oder mehreren strukturierten, gekoppelten Netzblöcken durchzuführen. Die Netzblöcke können dabei beliebig

zu- oder auch ineinander arrangiert sein. Somit besteht die Möglichkeit, lokale Details mit feineren Netzblöcken höher aufzulösen. Zur Abbildung der Geometrie im Berechnungsnetz kommt der sogenannte FAVOR-Algorithmus (Fractional Area Obstacle Representation) zur Anwendung [3].

3.2 Modellaufbau

Das numerische Modell umfasst den Nahbereich des Wehrs mit jeweils 100 m Gelände und Flussschlauch in Richtung Ober- und Unterwasser. Somit können die gesamte FAA und das Wehrbauwerk in einem Modell erfasst werden. Durch diese Modellierung wird auch die Strömung in der FAA berechnet und muss nicht über Randbedingungen abgebildet werden. Die Wehrsteuerung wird durch interne Senken (Oberwasserseite) und Quellen (Unterwasserseite), sogenannte Massen- und Impulsquellen, modelliert. Durch diese Vorgehensweise ergibt sich eine realitätsnahe Modellierung der Strömung im Bereich der Wehranlage.

Als globale Randbedingungen wird im Zulauf der Volumenstrom und am Auslauf die entsprechende Wasserspiegellage vorgegeben. Da keine genaueren Daten zur Sohlenstruktur vorlagen, wurde das Gelände mit einer konstanten, äquivalenten Sandrauheit von 5 cm modelliert.

Zur Beurteilung der Strömungssituation wurden die beiden Abflusszenarien Q_{30} und Q_{330} sowie die Strömung in den Becken selbst untersucht (Bild 1).

4 Hydraulische Verhältnisse

4.1 Auffindbarkeit (Strömungen im Einstiegsbereich)

Die Modellierung wurde für verschiedene Abflusszustände und Wehrsteuerungen durchgeführt. Das reale Strömungsbild bei Q_{30} im bestehenden Zustand zeigt, dass im Unterwasser der Wehranlage in Höhe des geplanten Einstiegs eine Strömung entsteht, die im rechten Winkel zur Hauptströmung in Richtung der rechtseitigen Böschung verläuft. Diese Strömung konnte auch mit dem numerischen Modell nachgestellt werden. Dieses Strömungsmuster wird besonders bei zunehmendem Abfluss deutlich sichtbar.

Durch den Einbau der FAA entsteht zwischen dem rechten Wehrwiderlager und der FAA-Wand eine Rezirkulationszone, welche die Querströmung noch weiter verstärkt. Dadurch kommt es zu einer starken Beeinflussung der Leitströmung aus der FAA. Der Einfluss der Wehrströmung auf die Leitströmung wurde im numerischen Modell durch die Zugabe eines Tracers veranschaulicht. Der Tracer wurde in der FAA auf Höhe des Wehrbauwerks und an den Wehrfeldern zugegeben.

Die mit dem Modell nachgewiesene pulsierende Querströmung, die im Tosbecken der Wehranlage durch den Wehrüberfall entsteht, tritt unmittelbar im Bereich des Einstieges in

die FAA auf und führt dazu, dass die aus der FAA austretende Leitströmung ebenso pulsierend und nicht gerichtet ins Unterwasser abgegeben wird. Der Leitstrom wird durch die Querströmung schon bei Q_{30} umgelenkt und in Richtung der rechtsseitigen Gewässerböschung gedrückt bzw. teilweise unterbrochen. Dieser Einfluss verstärkt sich mit zunehmendem Abfluss. Die Abbildungen zeigen Momentaufnahmen dieser Einflüsse. In einer zeitlichen Abfolge der Simulationsergebnisse können die beschriebenen Strömungsmuster und -defizite hinsichtlich der Auffindbarkeit noch wesentlich deutlicher dargestellt werden. Mit dem numerischen 3-D-Modell konnte für die FAA in der geplanten Bauweise eine nur unzureichende bzw. stark eingeschränkte Auffindbarkeit nachgewiesen werden, obwohl der Einstieg in Anlehnung an das Regelwerk unter Einhaltung der Grenzwerte für den Einbindewinkel angeordnet wurde. Die Querströmung und auch die Rezirkulationszone wirken sich bei dieser Anordnung defizitär aus. Die Anordnung des Einstieges unmittelbar auf Höhe der unterwasserseitigen Flügelwand würde eine ebenso negative Einstiegssituation aufweisen. Die große Rezirkulationszone würde hier die Leitströmung zerschlagen. Zudem würden sich im Einstiegsbereich Sediment und Geschwemmsel ablagern.

Durch eine angepasste Wehrsteuerung und den Einbau zusätzlicher Strömungsrichter könnte die Auffindbarkeit erheblich verbessert werden. Hierfür können in einem numerischen Modell mit wenig Aufwand zusätzliche Bauteile eingefügt und deren Wirkung auf die Strömung untersucht werden. Hierbei ist aber unbedingt zu beachten, dass die Optimierungsmaßnahmen

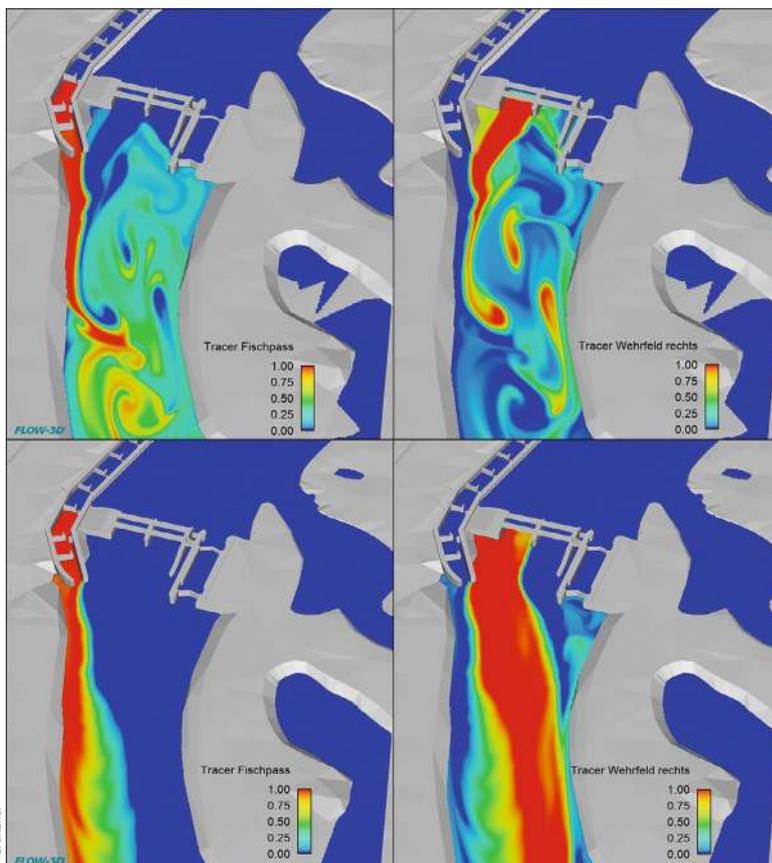


Bild 2: Lockstrom- und Wehr-Tracer für den Abfluss Q_{30} (obere Zeile) und den Abfluss Q_{330} bei Abfluss unter dem Schütz (untere Zeile)

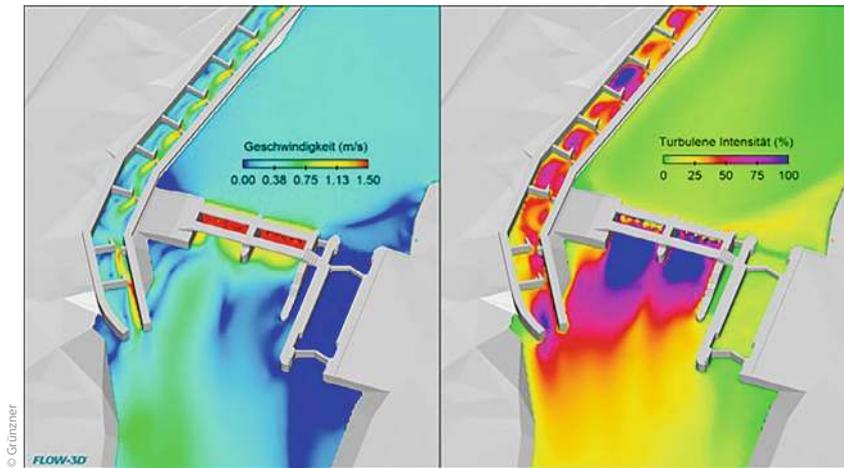


Bild 3: Abfluss Q_{330} : links Geschwindigkeiten, rechts turbulente Intensität [%]

von Fall zu Fall unterschiedliche Auswirkungen auf die Strömungsmuster haben können. Diese sind immer am entsprechenden Planungsobjekt selbst zu untersuchen.

Im vorliegenden Fall wurden zur Verbesserung der Auffindbarkeit insbesondere bei Q_{30} für das Wehr mehrere alternative Wehrsteuerungen untersucht, bei denen der Abfluss über die Wehranlage jeweils nur über das rechte oder linke Wehrfeld erfolgt. Gemäß Regelwerk sollte bei niedrigem Abfluss nur das der FAA benachbarte Wehrfeld (rechtes Wehrfeld) beaufschlagt werden, so dass der Wehrabfluss im Sinne einer Leitströmung die Auffindbarkeit der FAA verbessert. Diese Steuerung wurde aufgrund der Hinweise im Regelwerk zuerst untersucht. Im Ergebnis hat sich herausgestellt, dass die Beaufschlagung des rechten Wehrfeldes die Auffindbarkeit nicht verbessert, sondern durch eine stärkere Querströmung noch weiter verschlechtert.

Infolgedessen wurde die zweite Steuerungsvariante untersucht, bei der der Abfluss nur über das linke Wehrfeld erfolgt. Hierbei entsteht unterhalb des rechten Wehrfeldes eine starke Kehrströmung, die die Situation im Einstiegsbereich ebenfalls weiter verschlechtert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der Einstiegsituation allein über die Wehrsteuerung (Abfluss über Schütz) im untersuchten Fall nicht möglich ist. Hier sind zusätzliche Einbauten erforderlich, um rechtsseitige Kehr- und Querströmungen zu verhindern. Der Einstieg könnte im vorliegenden Fall auch unterhalb der negativ beeinflussten Strömungsbereiche angeordnet werden. Hierzu sollen noch weitere vertiefende Untersuchungen erfolgen.

Alternativ zum Abfluss über die Schützen (vorhandene Situation) wurde auch der Abfluss unter den Schützen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse untersucht. Im **Bild 2** sieht man sehr deutlich, dass im Vergleich zur gegenwärtigen Steuerung bei unterströmten Schützen keine Querströmungen am Ende des Torbeckens (Einstiegsbereich FAA) entstehen. Die Strömungsfahne der Wehranlage tritt nahezu geradlinig aus der Anlage aus. Im Unterwasser der FAA bildet sich eine nahezu ungestörte Lockstromfahne aus, die von aufwärts wandernden Fischen sehr gut wahrgenommen werden kann. Die Fische werden bei dieser Steuervariante durch die von der FAA ausgehenden, weit ins Unterwasser reichenden, Lockstromfahne entlang des Prallhangufers in die FAA geführt. Die Auffindbar-

keit des Einstiegs ist beim Abfluss unter den Schützen gegeben und wird nur marginal von der konkurrierenden Wehrströmung beeinflusst.

Durch eine derartige Steuerung kann am Standort die Auffindbarkeit verbessert werden. Jedoch ist hierfür noch intensiver zu prüfen, ob sich durch die veränderte Steuerung negative Veränderungen im Unterwasser (Kolkbildung etc.) ergeben. Es ist zu untersuchen, ob das Tosbecken zur Verbesserung der Energieumwandlung bei Schützunterströmung umgebaut und ggf. mit Einbauten ausgestattet werden muss. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass am Ende des Tosbeckens eine Kolksicherung erforderlich wird.

4.2 Passierbarkeit der FAA

Für die Einschätzung der Passierbarkeit der FAA wurden die Fließgeschwindigkeiten bis 1,50 m/s (Bemessungsfließgeschwin-

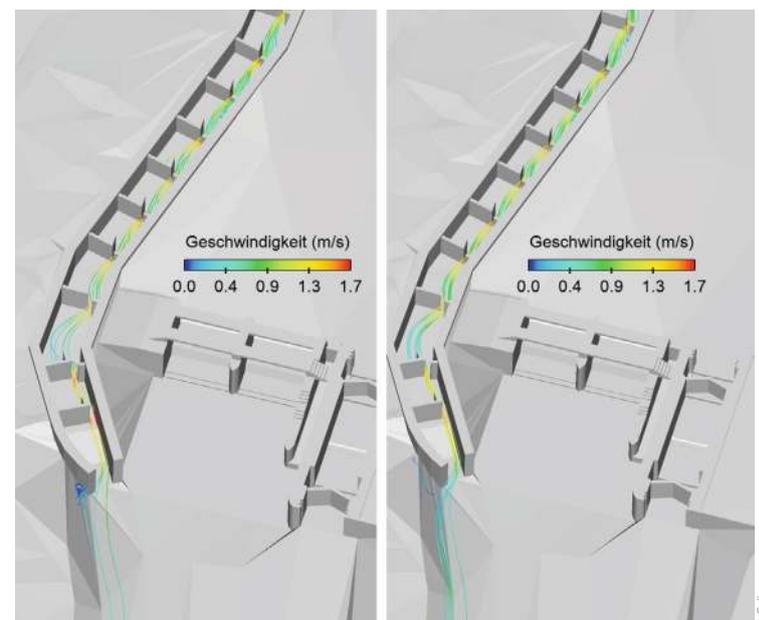


Bild 4: Stromlinien in der FAA: links Abfluss Q_{30} , rechts Abfluss Q_{330} , in beiden Fällen erkennbare Kurzschlussströmung in den unteren Becken

digkeit = 1,44 m/s) dargestellt. Zudem wurde in der Simulation die turbulente Intensität (in %) dargestellt. Hierbei handelt es sich um Schwankungen um den Mittelwert der Geschwindigkeit im Modell. Diese Variable verdeutlicht die Bereiche großer Turbulenzen. Wie in **Bildern 2** und **3** gut zu erkennen ist, treten in den Schlitzen hohe Fließgeschwindigkeiten auf. In den geradlinig verlaufenden Becken stellt sich ein typisches Strömungsbild für strömungsstabile Verhältnisse ein. Im Bereich der beiden untersten Trennwände treten im Vergleich höhere Fließgeschwindigkeiten auf, da die zweite Trennwand aufgrund ihrer Position direkt nach der Beckenabwinkelung ungünstig angeströmt wird. Dies hat zur Folge, dass sich anschließend ein hydraulischer Kurzschluss am Schlitz der ersten Trennwand ausbildet und dort die Grenzgeschwindigkeit mit Fließgeschwindigkeiten von bis zu 1,7 m/s bei Q_{30} überschritten wird (**Bilder 3** und **4**). Verstärkt wird dies durch die vom Standard abweichende Auslegung der ersten Trennwand ohne Umlenkblock.

Bei Q_{30} relativiert sich das Problem aufgrund des ansteigenden Unterwasserspiegels. Die Grenzwerte werden bei Q_{330} eingehalten. Neben den hohen Fließgeschwindigkeiten ist zu erkennen, dass sich der Leitstrom im Einstiegsbereich an die Wandung der FAA anheftet. Zur Verbesserung des Strömungsverlaufes in der FAA sind Optimierungen zwingend notwendig. So zeigt sich zum einen, dass bei Schlitzpässen auf den Umlenkblock nicht verzichtet werden kann, da ansonsten ungünstige Strömungsverhältnisse auftreten. Zum zweiten sollte die zweite Trennwand nicht nach, sondern kurz vor der Beckenabwinkelung angeordnet werden. Und schließlich dürfte es förderlich sein, wenn anstelle der bisher vorgesehenen Verengung am Einstieg eine weitere typische Trennwand mit Umlenkblock angeordnet wird, um die Leitströmung gerichtet aus der FAA austreten zu lassen. Die Leitströmung tritt dann mit vollem Impuls aus der FAA aus.

Grundvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit dieser Anlage ist die Verbesserung der Auffindbarkeit durch Reduzierung der von der Wehranlage ausgehenden Querströmung sowie die Verbesserung der Strömungssituation im Bereich der untersten beiden Trennwände.

Die zuvor benannten Optimierungen wurden dem Anlagenbetreiber empfohlen und sollten in den weiterführenden Planungsschritten beachtet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationen dieser Untersuchung haben gezeigt, dass auch bei regelkonformer Anforderung und Ausführung von FAA Probleme am Standort entstehen können, die sich in teils erheblichem Maße auf die Funktionsfähigkeit der FAA auswirken können. Mit Hilfe von 3-D-hydrnumerischen Modellen können diese bereits in der Planungsphase erkannt und beseitigt bzw. optimiert werden.

Der große Vorteil der numerischen Modelle liegt darin, dass ein umfassender Blick auf das Bauwerk und die signifikanten Strömungsprozesse gewonnen werden kann. Die Untersuchungen wurden ursprünglich wegen der Auffindbarkeit der FAA durchgeführt. Dass aber auch bei der Gestaltung der Becken, der Positionierung des Bauwerks und der Wehrsteuerung Optimie-

rungsbedarf bestehen würde, ist erst durch die Auswertung der Simulationen erkannt worden.

Gerade bei Bauwerken, die nach Fertigstellung nur noch schwer zugänglich sind, ist eine Optimierung in der Planungsphase überaus wichtig, um spätere Mehrkosten einer Anpassung zu vermeiden. Es empfiehlt sich daher, bei solchen kostenintensiven Bauwerksergänzungen immer eine 3-D-Strömungsanalyse durchzuführen, besonders dann, wenn ggf. erforderliche Nachbesserungen nur schwer und mit erheblichem Aufwand durchführbar sind.

Autoren

Marcel Härtel M. Sc.

IPP Hydro Consult GmbH
Gerhart Hauptmann-Str. 15
03044 Cottbus
m.haertel@ipp-hydro-consult.de

Dipl.-Ing. Markus Grünzner

Flow Science Deutschland GmbH
Sprollstr. 10/1
72108 Rottenburg
mg@flow3d.de

Literatur

- [1] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. In: DWA-Merkblätter (2014), M 509.
- [2] Flow Science Inc. (Hrsg.): FLOW-3D Documentation. Santa Fe (USA), 2020.
- [3] Hirt, C. W.; Nichols, B. D.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. In: Journal of Computational Physics 39 (1981), Nr. 1, S. 201-225.

Marcel Härtel and Markus Grünzner

Numerical 3D simulation - Investigation of the attraction flow at the lower Puhlstrom barrier

The article is dealing about the numerical investigation of the attraction flow of the planed fish passage structure at the "Puhlstrom Weir". The attraction flow from the vertical slot pass varies with the different operation modes of the weir gates. The detectability of the fishpass has been optimized by using 3D CFD code FLOW-3D. It has shown that 3D-CFD is a very helpful tool to illustrate the flow behavior and how the attraction flow interact with the weir main flow. This article illustrates the capability of 3D CFD as a very helpful tool for the design and layout optimization ahead of an expensive building process.

 Springer Professional

Strömungssituationen

Wagner, F.: Vergleichende Analyse des Fischabstiegs an drei Wasserkraftanlagen einer Kraftwerkskette. In: Wasserwirtschaft, Ausgabe 2-3/2016. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
www.springerprofessional.de/link/7501896

Seibl, J.; Gabl, R. et al.: Alternativer hydraulischer Schutz des Triebwasserwegs – Konzept, Modellversuch und numerische 3-D-Simulation. In: Wasserwirtschaft, Ausgabe 5/2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
www.springerprofessional.de/link/12243618