

Neubau des KW Töging und des Wehres Jettenbach – physikalische und numerische Untersuchungen

Josef Schneider, Gabriele Harb und Gerald Zenz

Zusammenfassung

Die VERBUND Innkraftwerke GmbH plant im Rahmen des Projektes der „Erneuerung Kraftwerk Töging“ den Neubau des Wehres Jettenbach und des Krafthauses Töging am Inn. Das neue Krafthaus soll neben dem bestehenden Kraftwerk errichtet werden. Das neue Wehr Jettenbach soll im Unterwasser der bestehenden Wehranlage Jettenbach am Inn entstehen. Die Gesamtanlage besteht derzeit aus einem 6-feldrigen Wehr mit Doppelhakenschützen, einem unmittelbar an das Wehr linksufrig anschließenden, 0,4 MW Wasserkraftwerk Jettenbach 1 mit 7,3 m³/s Ausbaudurchfluss, dem 2004 errichteten, 5 MW Restwasserkraftwerk mit 75 m³/s Ausbaumengen auf der rechten Flussseite sowie dem Einlaufbauwerk zum Innkanal Jettenbach - Töging.

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz wurde im Jahr 2014 beauftragt, sowohl für den Neubau des Kraftwerkes aber auch für die Neuerrichtung der Wehranlage Untersuchungen durchzuführen. Neben der Errichtung eines Schnittmodelles der neuen Wehranlage im Maßstab 1:30 wurden Vollmodelle der Wehranlage Jettenbach im Maßstab 1:40 sowie des neuen Kraftwerkes Töging ebenfalls im Maßstab 1:40 gebaut. Daneben wurden mehrdimensionale numerische Untersuchungen der Bauphasen beider Anlagenteile aber auch die Betriebsphasen durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag soll die umfangreichen Untersuchungen zusammenfassend darstellen und somit einen Einblick in die physikalische und numerische Modellierung für größere Bauprojekte im alpinen Raum gewähren.

1 Einleitung

Die VERBUND Innkraftwerke GmbH plant im Rahmen des Projektes der „Erneuerung Kraftwerk Töging“ den Neubau des Wehres Jettenbach und des Krafthauses Töging am Inn. Geographisch liegt das Wehr Jettenbach in der Gemeinde Aschau im Landkreis Mühldorf. Das Stauziel beträgt derzeit 403,35 mVS. Für die Konzeptionierung des Neubaus und für das wasserrechtliche Genehmigungsverfahren sollen die hydraulischen Randbedingungen für einen Ersatzneubau bei einem neu zu beantragenden 0,70 m höheren Stauziel auf Kote 404,05 mVS optimiert werden.

Das neue Wehr Jettenbach soll etwa 50 m unterhalb der bestehenden Wehranlage Jettenbach am Inn errichtet werden. Die Gesamtanlage besteht derzeit aus einem 6-feldrigen Wehr mit Doppelhakenschützen, den unmittelbar an das Wehr anschließenden Restwasserkraftwerken auf der rechten und linken Flussseite sowie dem Einlaufbauwerk zum Innkanal Jettenbach - Töging.

Von der VERBUND Innkraftwerke GmbH wurden ein hydraulisches Schnittmodell, ein hydraulisches Vollmodell und begleitende, bzw. ergänzende numerische Untersuchungen der geplanten neuen Wehranlage Jettenbach am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz beauftragt.

Als erster Schritt wurden in einem hydraulischen Schnittmodell die Wehranlage samt Wehrrücken und Tosbecken untersucht und optimiert. Anschließend wurden im Vollmodell und in numerischen Simulationen folgende Tests durchgeführt. Es wurde das Vollmodell (1) der bestehenden Wehranlage untersucht, um das physikalische Modell anhand vorhandener Messdaten vom Prototypen zu kalibrieren, (2) die hydraulischen Bedingungen während der einzelnen Bauabschnitte untersucht, (3) die neue Wehranlage zusätzlich zur alten Wehranlage im Modell eingebaut, um allfällige Verklausungen im Falle des Bestehenbleibens der alten Wehranlage beurteilen zu können und (4) die alte Wehranlage entfernt, um die zukünftige Situation im Inn zu erfassen und die neue Wehranlage zu optimieren.

In einem hydraulischen Vollmodell in Kombination mit zwei- und dreidimensionalen numerischen Untersuchungen wird die Zuströmung zum Krafthaus und die Einlaufgeometrie sowie die Bauzustände untersucht und optimiert. Dabei werden die Bauphasen im Unterwasser physikalisch und numerisch untersucht, im Oberwasser kommen ausschließlich numerische Verfahren zum Einsatz. Die Untersuchungen des neuen Kraftwerkes erfolgen im Ober- als auch im Unterwasser sowohl numerisch als auch physikalisch.

Zur Zeit (März 2016) sind die Versuche für das Modell Töging bereits abgeschlossen, beim Wehr Jettenbach werden noch der Fischabstieg sowie die Zuströmung zu dem rechtsufrigen, bestehenden Restwasserkraftwerk untersucht

2 Projektgebiet und Hintergrund

2.1 Beschreibung Projektgebiet

Das Kraftwerk Töging mit der zugehörigen Wehranlage Jettenbach befindet sich am unteren Inn in Bayern. Eine Übersichtskarte sowie Darstellungen der bestehenden Wehranlage und des bestehenden Kraftwerkes sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die Wehranlage Jettenbach mit dem Kraftwerk Töging ist seit 1924 in Betrieb. Das linksufrige Restwasserkraftwerk an der Wehranlage mit einem Ausbaudurchfluss von 7,3 m³/s und 0,4 MW ist mit der Wehranlage 1924 und das linksufrige Restwasserkraftwerk im Jahre 2004 in Betrieb gegangen, leistet 5 MW bei einem Ausbaudurchfluss von 75 m³/s und einer Ausbaufallhöhe von 8,8 m. Die Regelabgabe (RAV) beträgt 29,1 GWh (Gerauer, 2015).

Das Kraftwerk Töging hat eine Engpassleistung (EPL) von 85,3 MW bei einem Ausbaudurchfluss von 340 m³/s und einer Ausbaufallhöhe von 30,5 m. Die Regelabgabe beträgt hier 557,2 GWh (Gerauer, 2015).

Durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Ausleitungskanals im Rahmen einer Sanierung im Jahre 2003 wurden Überlegungen angestellt, eine Steigerung der Effizienz zu erwirken, indem das Stauziel erhöht sowie die Krafthausanlage erneuert wird. Das Alter und der schlechte technische Zustand der Wehranlage erzwangen desweiteren einen Ersatz durch eine neue Wehranlage.

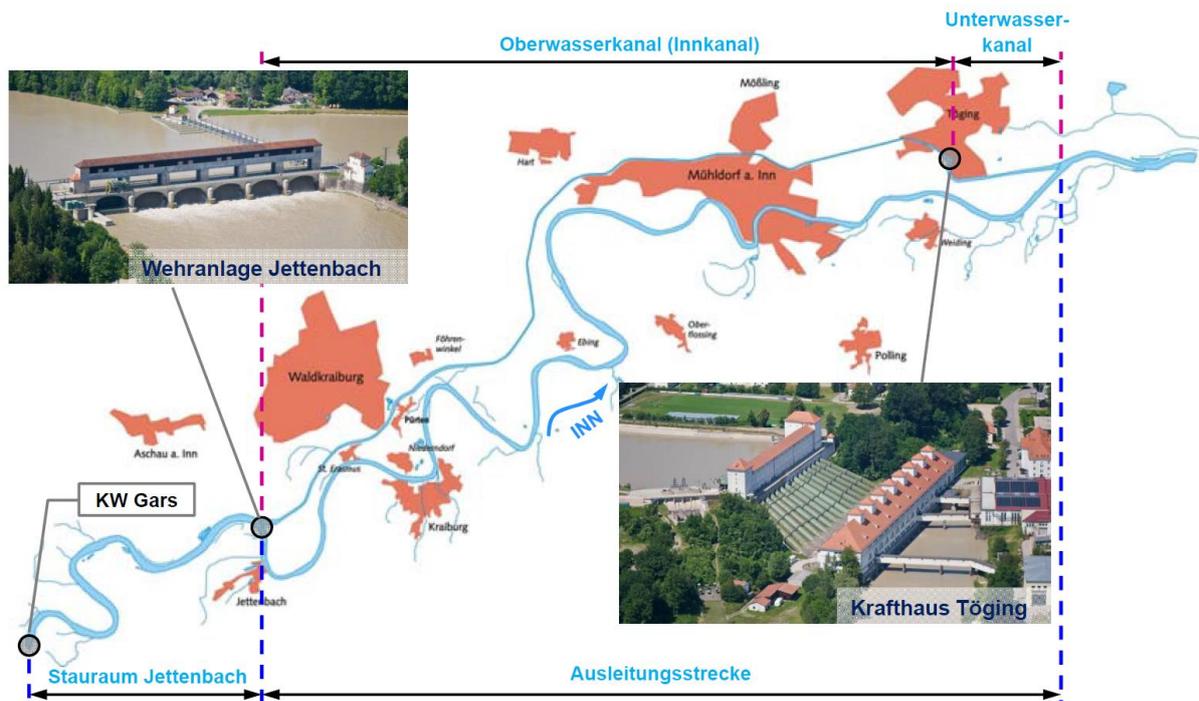


Abb. 1 Kraftwerk Töging mit Wehranlage Jettenbach (Gerauer, 2015)

Die geplanten technischen Änderungen nach Errichtung der Neuanlagen sind in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt:

Tab. 1 Technische Daten hinsichtlich Neubau Jettenbach und Töging (Gerauer, 2015)

	Bestand	Nach Umbau	Δ
Ausbaudurchfluss	340 m ³ /s	410 m ³ /s	+ 70 m ³ /s
Fallhöhe	30,6 m	31,1 m	+0,5 m
EPL	85,3 MW	110 MW	+ 24,7 MW
RAV	557,2 GWh	677,2 GWh	+ 120 GWh
Investition (lt. Studie 2012)		Rd. 220 Mio €	

3 Modellierung und Methodik

3.1 Physikalische Modelle

Sowohl das Schnittmodell des Wehres Jettenbach als auch die beiden Vollmodelle werden nach dem Froude'schen Modellgesetz betrieben. Dieses Modellgesetz beschreibt, dass das Verhältnis der Trägheits- und Schwerekräfte in der Natur und im Modell gleich groß ist, wodurch eine geometrisch ähnliche Nachbildung der Strömung ermöglicht wird. Der gewählte Modellmaßstab für das Schnittmodell beträgt 1:30 und für die beiden Vollmodelle 1:40.

3.1.1 Das Schnittmodell

Im Schnittmodell wird ein halbes Wehrfeld mit einem halben Wehrpfeiler in ein 12 m langes Versuchsgerinne aus Kunststoff eingebaut. Die orografisch rechts liegende Glaswand der Versuchsrinne liegt dabei in der Symmetrieebene des abgebildeten Wehrfelds. Das Oberwasser des Schnittmodells ist mit fester Sohle ausgeführt, unterwasserseitig des Tosbeckens ist eine bewegliche Sohle eingebaut. Dafür wird Terracottasplitt mit Korngrößen von 8-12 mm und einer Feststoffdichte von 2300 kg/m^3 im Modell eingebaut.

Versuchsprogramm

Folgende Punkte wurden im Rahmen der Modellversuche am Schnittmodell untersucht:

- Bestimmung der Drücke am Wehrhöcker
- Bestimmung der Wehrförderfähigkeit bei freiem Durchfluss und verschiedenen Segment- und Klappenstellungen
- Untersuchung der Tosbeckengeometrie
- Auftreffpunkt des Überfallstrahles
- Spülversuch im Wehrbereich

3.1.2 Das Vollmodell Jettenbach

Die bestehende Wehranlage Jettenbach mit den Bauabschnitten BA2, BA3b und dem Endzustand wird in chronologischer Reihenfolge als Vollmodell im Maßstab 1:40 im Labor der TU Graz nachgebildet.

Das Modell entspricht einer Naturlänge von knapp 700 m, im Labor hat das Modell eine Oberwasserlänge von 11,1 m, der Unterwasserbereich ist etwa 5 m lang, dazwischen liegen die alte Wehranlage und der Bereich für die neue Wehranlage mit Tosbecken. Das Modell weist eine Breite von etwa 4,7 m und eine Höhe von 0,65 m auf. Die Umrandungen des Modells werden klassisch aufgemauert, die Böschungen aus Beton gefertigt und die Sohle teils fest betoniert, teils beweglich mittels Sedimenten modelliert. Die Wehrpfeiler bestehen aus Beton, die Verschlüsse und Krafthäuser sind aus Kunststoffen wie Plexiglas und Trovidur gefertigt.

Versuchsprogramm Bauphasen im Vollmodell

Das Versuchsprogramm wurde für die Bauphasen BA2, BA3b (siehe Abbildung 2) durchgeführt. Für die unterschiedlichen Abflüsse wurden die Wasserstände (Spiegellinien) erfasst sowie die Kolkbildung untersucht. Folgende Lastfälle wurden betrachtet:

- HQ_{100} Winter ($1437 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Abfluss mit 0,5 m Freibord ($1650 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Bordvoller Abfluss HQ_5 ($1750 \text{ m}^3/\text{s}$)
- HQ_{20} ($2200 \text{ m}^3/\text{s}$)
- HQ_{100} ($2850 \text{ m}^3/\text{s}$)

Auf im Rahmen der durchgeführten physikalischen und numerischen Untersuchungen hinsichtlich Tosbeckenoptimierung und Nachkolsicherung sowie der Zuströmung zum Restwasserkraftwerk, Verklauung der bestehenden Wehranlage, Fischabstieg, etc. kann im Rahmen dieses Beitrages nicht näher darauf eingegangen werden.

3.1.3 Das Vollmodell Töging

Das neue Kraftwerk Töging wird als Vollmodell im Maßstab 1:40 im Labor der TU Graz nachgebildet. Das Oberwasser und das Unterwasser des Vollmodells sind mit fester Sohle ausgeführt.

Das Modell entspricht einer Naturlänge von knapp 780 m mit einer Zulaufänge von 380 m und einer Unterwasserlänge von 200 m. Der Bereich vom Einlauf bis zum Saugrohrende ist in der Natur ca. 86 m lang. Im Labor hat das Modell eine Zulaufänge im Oberwasser von 9,8 m, der Unterwasserbereich ist etwa 5 m lang, dazwischen liegt der Bereich vom Einlauf bis zum Saugrohrende mit einer Länge von 2,15 m. Das Modell weist eine mittlere Breite von 2,25 m und eine Höhe im Oberwasser von 1,70 m und im Unterwasser von 0,80 m auf.

Abbildung 2 zeigt das Vollmodell im Trockenzustand.



Abb. 2 Vollmodell Kraftwerk Töging im Wasserbaulabor der TU Graz, M 1:40, Ausgangszustand

Neben der fotografischen und Videodokumentation wurden geodätische sowie Geschwindigkeitsmessungen im Zulaufkanal als auch im direkten Turbineneinlaufbereich mittels ADV-Sonde (Vectrino) durchgeführt. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

Versuchsprogramm Vollmodell Töging

Untersuchungen numerisches Modell:

- Optimierung Zulauf (3D)
- Untersuchung Bauzustand im Unterwasser (2D)
- Untersuchung Bauzustand Oberwasser (2D)

Untersuchungen Vollmodell:

- Bestimmung der Wasserspiegel im Unterwasser im Bauzustand
- Zuströmung zum Einlaufbauwerk
- Untersuchung des Feststofftransports für den optimierten Zustand

3.2 Numerische Modellierung

Die 2D und 3D numerischen Berechnungen wurden mit dem Programm TELEMAC-2D durchgeführt. Das Programm wurde von der Électricité de France (EDF) als Teilmodule des TELEMAC-MASCARET Systems entwickelt und ist seit 2010 als Open-Source-Software verfügbar.

Das hydrodynamische Programm TELEMAC-2D löst die zweidimensional tiefengemittelten Saint-Venant Gleichungen mittels der Finite Elemente Methode auf Basis von unstrukturierten Dreiecksnetzen. Bei der Tiefenmittelung wird die vertikale Impulsgleichung zu einer hydrostatischen Druckgleichung vereinfacht, damit sind die zu lösenden Variablen die Fließgeschwindigkeiten in zwei Raumrichtungen (U, V) und die Wassertiefe (h).

Die mathematische Beschreibung von TELEMAC-2D ist in Hervouet (2007) bzw. auf <http://www.opentelemac.org> zu finden.

Für die Optimierung des Zulaufes des neuen Kraftwerkes Töging wurde weiters die Software CFX (Ansys) eingesetzt. Die Geometrie im Oberwasser wurde aus den Plandaten entnommen. Das Berechnungsnetz wurde mit ANSYS ICEM erstellt. Es wurden 2,7 Mill. hexahedrale Elemente und 2,8 Mill. Berechnungsknoten verwendet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieses Kapitels können beispielhaft nur exemplarisch Ergebnisse aus der Vielzahl an Untersuchungen dargestellt werden.

4.1.1 Das Schnittmodell

Neben der Bestimmung der Förderfähigkeit der Klappen wurden auch die Druckverteilungen am Wehrhöcker ermittelt, wobei sich gezeigt hat, dass für alle Lastfälle positive Drücke auftreten und somit keine Auffälligkeiten gegeben sind. Die Entlandungsversuche direkt oberwasserseitig des Verschlusses konnten insofern optimiert werden, als die maßgeblichen Durchflüsse und Segementhubstellungen definiert wurden.

Die Wehrförderfähigkeit konnte bis zu einem HQ_{1000} bzw. $HQ_{100 (n-1)}$ nachgewiesen werden, wobei eine Adaptierung der Höhe der Wehrbrücke (Freibord) erfolgte. In Abbildung 3 ist links die Abflusssituation bei einem HQ_{1000} mit niedriger Brücke dargestellt. Rechts ist ein Beispiel hinsichtlich Untersuchung des Auftreffbereiches des Überfallstrahles abgebildet.

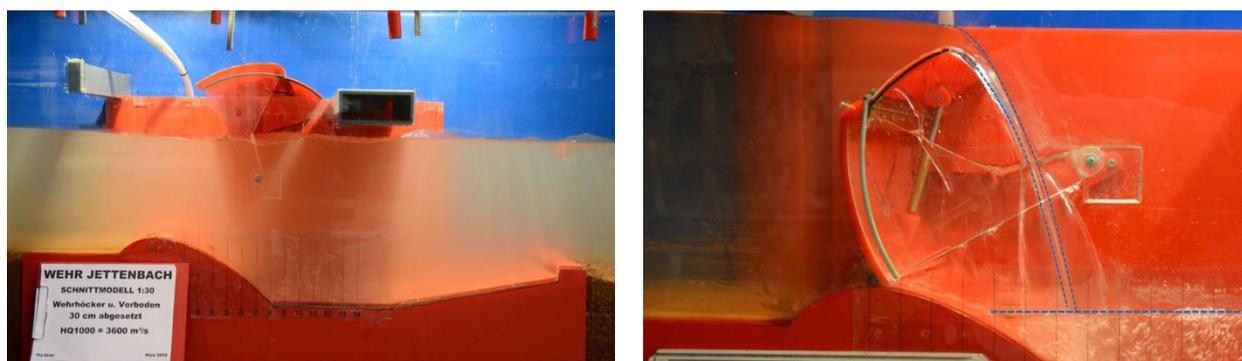


Abb. 3 Abflusssituation bei HQ_{1000} (links), Eintauchpunkt des Strahls bei beginnendem Klappenüberfall mit einem Unterwasserstand von 395,4 mVS (rechts)

4.1.2 Das Wehr Jettenbach

Im Rahmen der Untersuchungen des Modelles des Wehres Jettenbach wurden die Bauphasen betrachtet. Abbildung 4 zeigt das Modell im Trockenzustand mit den jeweiligen Bauphasen BA2 (links) und BA3b (rechts). Als maßgebender Lastfall wird im Rahmen dieses Beitrages das 100-jährliche Winterhochwasser vorgestellt, welches das Maßgebliche ist. Des Weiteren wurden im

Rahmen der Modelluntersuchungen auch größere Hochwasserereignisse (siehe Kapitel 3.1.2) betrachtet und beurteilt.



Abb. 4 Vollmodell Wehr Jettenbach im Wasserbaulabor der TU Graz mit alter Wehranlage und Bauabschnitt BA2 (links) und BA3b (Baugrube orographisch links und 2 fertiggestellte Wehrfelder) mit Nachkolsicherung durch Wasserbausteine

Im Lastfall $HQ_{100 \text{ Winter}}$ kann im Vollmodell ein Freibord von etwa 1,2 m eingehalten werden. In Abbildung 5 sind die gemessenen Wasserspiegel beim Lastfall $HQ_{100 \text{ Winter}}$ dargestellt. Im Profil 128+100 ergibt sich ein mittlerer Wasserspiegel von 401,0 mVS.

Im Vollmodell können durch den entstehenden Kolk auf der orographisch linken Seite der Baugrube die Sicherung der Spundwandanker angegriffen werden, falls keine ausreichenden Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Wie in Abbildung 5 ersichtlich ist, rutschen die Wasserbausteine im Modell durch die Kolkentwicklung in den Kolk nach (siehe Pfeil im Bild).

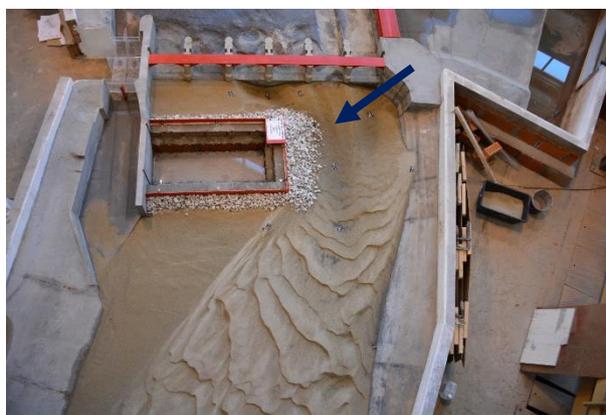
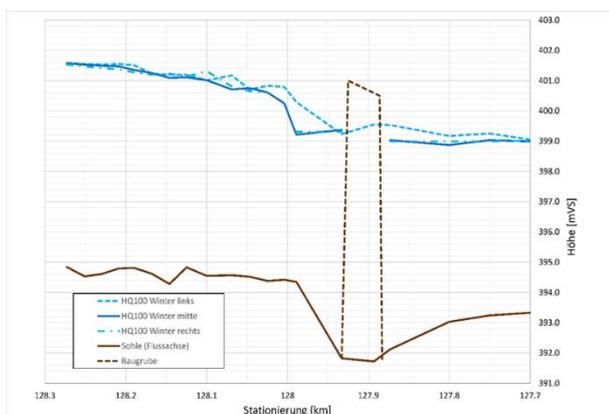


Abb. 5 Gemessene Wasserspiegel im Vollmodell BA2 mit einem Abfluss von $1437 \text{ m}^3/\text{s}$ mit entstehendem Kolk in der Sohle (links), Kolkbildung bei einem Abfluss von $1437 \text{ m}^3/\text{s}$ über ca. 12 Naturstunden (rechts)

Die Tiefe des Kolkes im Modell konnte mit 386,0 mVS bei Lastfall $HQ_{100 \text{ Winter}}$ beobachtet werden, wobei jedoch darauf hingewiesen werden muss, dass dies maßstabsbedingt nur einen qualitativen Wert darstellt. Wie tief sich Kolke im Prototyp tatsächlich ausbilden, hängt vor allem von den vorhandenen Korngrößen in der Natur ab.

Die berechneten maximalen Schubspannungen im Bereich neben der Baugrube für die Bauphase BA2 liegen bei etwa 120 N/m^2 , die durchschnittlichen Schubspannungen bei $50\text{-}60 \text{ N/m}^2$.

Die im Vollmodell eingebauten Korndurchmesser von 0,3 – 1,0 mm entsprechen einem Korndurchmesser von 12 – 40 mm in der Natur und werden umgerechnet bei Schubspannungen ab 10-30 N/m² bewegt. Daher wird die Kolkbildung im Vollmodell überschätzt. Bei Schubspannungen von 50-60 N/m² werden Korndurchmesser von 70-80 mm bewegt, bei 120 N/m² Korndurchmesser bis 160 mm. Daher ist die Sicherung der Sohle mit Wasserbausteinen in diesem Bereich zu empfehlen.

Die Auswirkungen eines HQ_{100 Winter} auf die Wehranlage während der Bauphase BA3b sowie die Berechnungsergebnisse der Sohlschubspannungen sind in Abbildung 6 dargestellt.



Abb. 6 Bauphase BA3b, HQ_{100 Winter}, Kolkbildung (links) und Sohlschubspannungen (rechts)

Zur Zeit werden Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des rechtsufrigen Fischabstieges vorgenommen. Neben der bereits bestehenden Fischaufstiegshilfe soll im Zuge des Umbaus Wehr Jettenbach eine Fischabstiegsvorrichtung vorgesehen werden, die mit einer Restwasserschnecke kombiniert wird. Dabei sollen sowohl auf oberflächennahe Jungfische als auch auf sohlnah wandernde Fischarten Bedacht genommen werden.

4.1.3 Das Kraftwerk Töging

Ein wichtiger Punkt für die Planungen des Kraftwerkes Töging stellen die Bauphasen dar. Dabei wurden einerseits im Oberwasser numerische Berechnungen durchgeführt, die keine außergewöhnlich hohen Fließgeschwindigkeiten im orografisch rechten Bereich oberwasserseitig des bestehenden Turbineneinlaufes ergeben haben. Andererseits konnten im physikalischen Modell die Fangedammhöhen im Unterwasser bei Simulation des bestehenden Kraftwerksbetriebes bestimmt werden (siehe Abbildung 7).

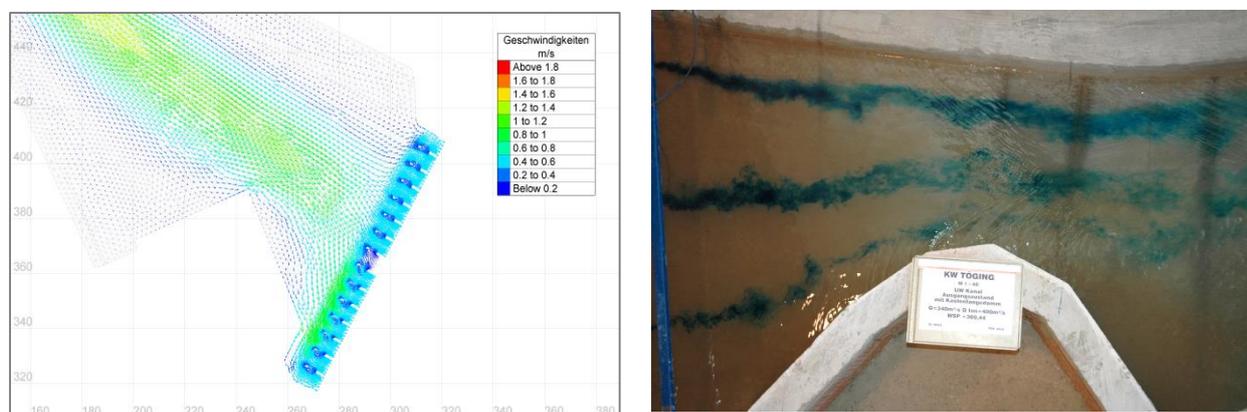


Abb. 7 Vollmodell Töging, Bauphase Bauphase Oberwasser, Telemac (links), Unterwasser (rechts)

Abbildung 8 stellt Ergebnisse sowohl numerischer als auch physikalischer Optimierungsschritte vor, welche eine möglichst gleichmäßige Zuströmung zu den drei Turbineneinläufen gewährleisten sollen.

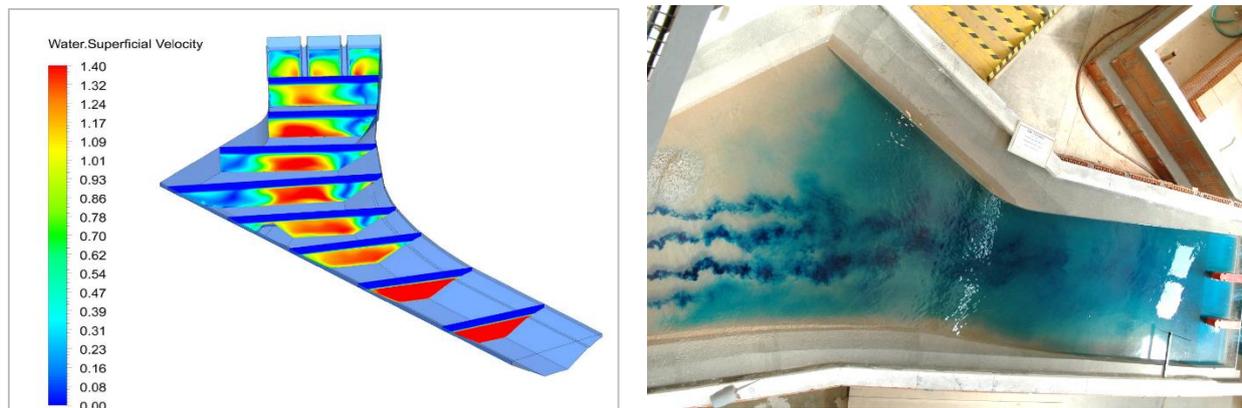


Abb. 8 Numerische Untersuchung Zuströmung Kraftwerk neu, CFX (links) und Zuströmung Oberwasser, Modell (rechts)

5 Schlussfolgerungen

Die im Schnittmodell untersuchten Fragestellungen können zufriedenstellend beantwortet und die Ergebnisse auf den Prototypen übertragen werden.

Die Wasserstandsmessungen im Bereich der Wehrbrücke zeigten, dass bei der adaptierten Wehrbrücke im ungünstigsten Lastfall $HQ_{100(n-1)}$ ein Freibord von 1,01 m bei Wellenschlag gegeben ist. Sowohl bei den Förderfähigkeitsmessungen der Verschlüsse als auch bei den Druckmessungen am Wehrhöcker konnten keine besonderen Auffälligkeiten beobachtet werden. Bei anspringender Entlastung über die Klappe konnte gezeigt werden, dass der Auftreffpunkt des Wasserstrahles nicht am Wehrhöcker, sondern bereits im Wasserpolster liegt.

Die Optimierung der Spundwandhöhen erfolgte im numerischen Modell und die Erkenntnisse wurden im physikalischen Modell überprüft. Die anschließenden Bauphasenversuche beim Wehr Jettenbach ermöglichten somit einerseits die Bestimmung der relevanten Wasserstände für die ausreichende Dimensionierung der Spundwandhöhen und andererseits die Beurteilung der Kolkbildung und mit Unterstützung der numerischen Berechnungen die Dimensionierung der Sohlsicherung mit Wasserbausteinen.

Zur Zeit noch laufende Untersuchungen hinsichtlich Fischabstieg sollen eine gute, für die abwärtswandernde Fischpopulation optimierte Strömungssituation gewährleisten.

Die numerischen und physikalischen Untersuchungen des geplanten Kraftwerkes Töging konnten einerseits die Grundlagenerkenntnisse für die Bauphasen bestimmen (Zuströmung zum bestehenden Kraftwerk und Dimensionierung Unterwasserfangedämme), andererseits wurden Erkenntnisse über Optimierungen der Zuströmung zu den Turbineneinläufen gewonnen.

Literatur

Gerauer B. (2015). Erneuerung KW Töging, Projektinformation, interne Präsentation

Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method. Chichester: Wiley

Anschrift der Verfasser

DI Dr. Josef Schneider

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz

schneider@tugraz.at

DI Dr. Gabriele Harb

ehem. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz

gabriele.harb@gmx.at

Univ.-Prof. DI Dr. Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Stremayrgasse 10/II, A-8010 Graz

gerald.zenz@tugraz.at