

Untersuchungen am physikalischen Modell zur Optimierung des neu zu errichtenden Kraftwerkes Stegenwald

Josef Schneider, Hannes Badura und Franz Georg Piki

Zusammenfassung

Die VERBUND Hydro Power GmbH und die Salzburg AG planen den Bau eines neuen Laufwasserkraftwerks (WKW) an der Salzach in Österreich. Das Wasserkraftwerk besteht aus einer linksufrigen Wehranlage mit zwei Wehrfeldern, die mit radialen Segmenten und aufgesetzten Klappen verschlossen werden können. Um eine Verringerung der Einbautiefe zu erreichen, werden vertikale Kaplan turbinen um 90 Grad gedreht und horizontal eingebaut. Die beiden Turbinenfelder sind durch Klappen aufgestaut und für einen ausreichenden und sicheren Hochwasserabfluss überflutbar ausgelegt. Diese Bauweise macht es erforderlich, einen nahezu waagerechten Einlaufrechen vorzusehen. Daher besteht die Gefahr, dass Geschiebe in die Turbineneinlässe gelangt. Um dies zu vermeiden, muss der Sedimentabwehr vor dem Turbineneintritt große Bedeutung beigemessen werden. Aus ökologischen Gründen, insbesondere um die Strömungsgeschwindigkeiten im Stauraum möglichst hoch zu halten, ist man bestrebt, die Länge des Stauraumes zu minimieren. Daher wird möglichst nahe an der Wehranlage eine Rampe errichtet. Form und Lage der Rampe sind entsprechend zu optimieren, damit die Strömung bei Hochwasser über die Wehrfelder geführt und die Sedimente vom Rechen ferngehalten werden.

Die Versuche an einem 1:40 Froude Modell ermöglichten die Optimierung der Kraftwerksanlage Stegenwald. Die starke Wirbelbildung im linken Turbinenzulauf konnte durch die Anordnung eines Trennpfeilers sowie dem oberwasserseitigen Verschieben der Klappen deutlich reduziert werden. Die Abmessungen der Tosbecken sowie die Nachkolk ausführung wurden ermittelt. Die Lage und Richtung der Rampe und die Anordnung von Geschiebeleitschwellen verhindern signifikant den Eintrag von Geschiebe in die Turbinen. Ausführliche Ergebnisse hinsichtlich der Rampenversuche werden im Beitrag von Pirker und Schneider (2023) „Modellversuch zur Untersuchung des Nachkolkbereichs einer Sohlrampe im Stauraum des KW Stegenwald“ vorgestellt.

Der vorliegende Beitrag fasst einige aus den Modellversuchen gewonnenen Erkenntnisse kompakt zusammen.

1 Einleitung

Die VERBUND Hydro Power GmbH und die Salzburg AG planen den Bau eines neuen Laufwasserkraftwerks (KW) an der Salzach in Österreich. Die Ausbauwassermenge beträgt 203 m³/s, die Fallhöhe ist mit 8,09 m definiert, was eine Leistung von 14,3 MW und eine mittlere jährliche Energiekapazität von rund 73,8 GWh erwarten lässt. Das Wasserkraftwerk besteht aus einer linksufrigen Wehranlage mit zwei Wehrfeldern, die mit radialen Segmenten und aufgesetzten Klappen verschlossen werden können. Das Kraftwerkskonzept weist einige Besonderheiten auf. Um eine Reduzierung der Einbaulänge und -tiefe zu erreichen, werden vertikale Kaplan turbinen um 90 Grad gedreht und horizontal eingebaut. Die beiden Turbinenfelder sind durch Klappen gestaut und überflutbar ausgelegt, um einen ausreichenden und sicheren Hochwasserabfluss zu gewährleisten. Diese Bauweise macht den Einbau eines nahezu waagerechten Einlaufrechens erforderlich. Daher besteht die Gefahr, dass Geschiebe in die Turbineneinlässe gelangt. Um dies

zu vermeiden, muss der Sedimentabwehr vor dem Turbineneintritt große Bedeutung beigemessen werden. Der in diesem Symposium eingereichte Beitrag von Pirker und Schneider (2023) behandelt dieses Thema ausführlicher.

Aus ökologischen Gründen, insbesondere um die Strömungsgeschwindigkeiten im Stauroaum möglichst hoch zu halten, ist man bestrebt, die Länge des Stauroams zu minimieren. Daher wird möglichst nahe oberwasserseitig der Wehranlage eine Rampe gebaut. Form und Lage der Rampe sind entsprechend zu optimieren, damit die Standfestigkeit der Rampe bei Hochwasser gewährleistet und die Strömung über die Wehrfelder geführt und somit die Sedimente vom Rechen ferngehalten werden.

2 Methodik

2.1 Das Modell

Das Vollmodell des Kraftwerks Stegenwald wurde im Wasserbaulabor der TU Graz aufgebaut. Der Modellversuch umfasst neben dem Hauptbauwerk des Laufwasserkraftwerks mit Krafthaus und Wehranlage einen 460 m langen Oberwasserbereich und einen 240 m langen Abschnitt im Unterwasser. Das Modell wurde klassisch mit Ziegeln und Beton errichtet. Die Wehranlage sowie das Krafthaus bestehen aus durchsichtigem Plexiglas sowie Kunststoff. Die verwendeten Sedimente sind auf den Naturmaßstab abgestimmt und bestehen teils aus mineralischen Sedimenten und teils aus Kunststoffen. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Modell im Maßstab 1:40. Das Modell wurde nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude betrieben.

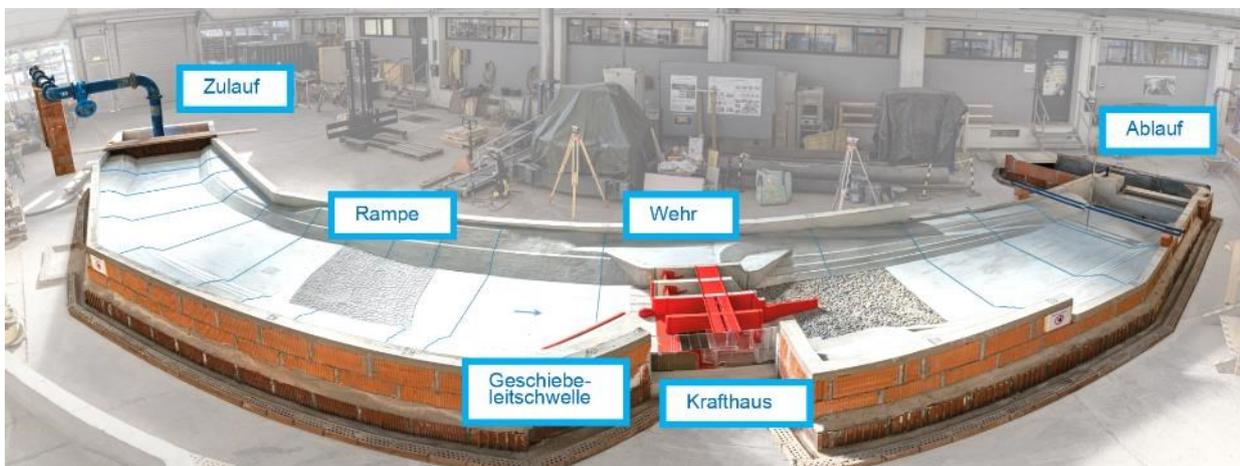


Abb. 1 Übersicht Modell KW Stegenwald, Maßstab 1:40 (Foto: Piki/TU Graz)

2.2 Aufgabenstellung und Messungen

Für die Untersuchungen werden sedimentologische und hydrologische Kennwerte vom geplanten Kraftwerkstandort verwendet. Die Abflüsse decken einen Bereich zwischen Mittelwasser und rechnerisch höchstem Hochwasser ab. Alle Tests erfolgen stationär.

Die Ziele des Modelltests umfassen grob folgende Punkte:

- Untersuchung der Wehranlage inkl. Tosbeckenoptimierung, Wehrförderfähigkeit und Ausbildung des Wehrrückens, Beherrschung des Nachkolks
- Anströmung des Krafthauses und der Turbinen
- Sedimenttransport im Ober- und Unterwasser einschließlich Konzeption der Rampe
- Freibord der Brücken

Zur Erreichung der Ziele kommen vor allem Messungen von Strömungsgeschwindigkeiten mittels ADV Sonden sowie Sohlvermessungen mit Hilfe der Laserscannertechnologie (TLS) zum Einsatz. Die visuelle Beurteilung der Strömungsbilder erfolgt durch Zugabe von Tracern (Farben sowie Schwimmstoffe) und fotografischer Auswertungen (auch Videos).

Nähere Details sind im Endbericht angeführt (Zenz et al., 2022).

3 Ergebnisse

3.1 Wehranlage und Tosbecken

Die Form des Wehres wird nach USBR (1987) optimiert und das Tosbecken für eine sichere Energiedissipation entwickelt. Der Ausgangszustand des Tosbeckens ist wegen unzureichender Energiedissipation nicht zufriedenstellend und es kommt zu einer unterwasserseitig des Tosbeckens gelegenen Kolkbildung. Um eine zufriedenstellende und sichere Lösung für die endgültige Gestaltung des Beruhigungsbeckens zu finden, wurden größere Optimierungsmaßnahmen notwendig. Das Tosbecken wurde fünf Mal umgebaut. Für die endgültige Gestaltung wird die Ausgangslänge um 3,0 m auf 25,5 m reduziert, die Tiefe des Tosbeckens ebenfalls um 0,5 m reduziert und die Schwellenhöhe um 1,25 m abgesenkt. Die Tosbeckensicherheit ist auch bei Wehrfehlsteuerung gegeben. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Vergleich zweier Varianten, die zeitgleich beurteilt werden. Es handelt sich dabei um ein einjähriges Ereignis, bei dem beide Kraftwerksklappen geschlossen sind. Das innere Wehrfeld (Foto links, orografisch rechts) befindet sich im Ausgangszustand, das äußere Wehrfeld wurde bereits optimiert. Die erheblich besser funktionierende Energiedissipation in der optimierten Variante ist augenscheinlich. In Abbildung 3 sind die Auswirkungen auf den Nachkolk unterschiedlicher Varianten dargestellt. Nähere Informationen hinsichtlich der Optimierung der Tosbecken sind in Schneider et al. (2022) angeführt.



Abb. 2 Tosbeckenoptimierung, Ansicht der Wehranlage vom Unterwasser: Rechts das Wehrfeld 1 mit der Variante 3, links das Wehrfeld 2 mit der Geometrie des Ausgangszustands. Hochwasserabfluss $HQ_1(n-2)$. (Foto: Piki/TU Graz)



Abb. 3 Draufsicht vom Erosionsverhalten des unterwasserseitigen Bereichs der Kraftwerksanlage, Kolkbildung bei Tosbeckenvariante 1 (links) und Nachkolkssicherung Variante 5, Lastfall (rechts) nach $HQ_{100}(n-0)$, (Foto: Piki/TU Graz)

3.2 Anströmung Krafthaus

Abbildung 4 zeigt im linken Bild die Wirbelbildung beim 2-Maschinen-Betrieb für den Ausgangszustand. Es wird ein massiver, schnell rotierender Oberflächenwirbel beobachtet, der zu einem Wirbel und einem zweitweise erheblichen Lufteintrag in die Turbine führt. Grund dafür ist die relativ geringe Wasserüberdeckung über dem Rechen und die asymmetrische Umströmung des vorgelagerten Trennfeilers zwischen Wehr und Krafthaus. Die rechnerische Überprüfung der

erforderlichen Überdeckungshöhe nach einschlägiger Literatur zeigt, dass die hydraulische Mindestüberdeckung zur Vermeidung des Luft- und Dralleintrages in den Turbineneinlauf für die vorliegende Maschinenanordnung im Grenzbereich liegt.

Eine erhebliche Verbesserung dieser Situation wird erreicht, indem der vorgelagerte, sich unter der Wasseroberfläche befindliche Trennpfeiler (Lage: siehe gelber Pfeil) optimiert und die Klappen einige Meter stromaufwärts verschoben werden. Dadurch wird die Totstromzone stromabwärts der Turbineneinlässe verringert. Die Wirbelbildung und der Lufteintrag werden dadurch deutlich reduziert (Abbildung 4, rechts).

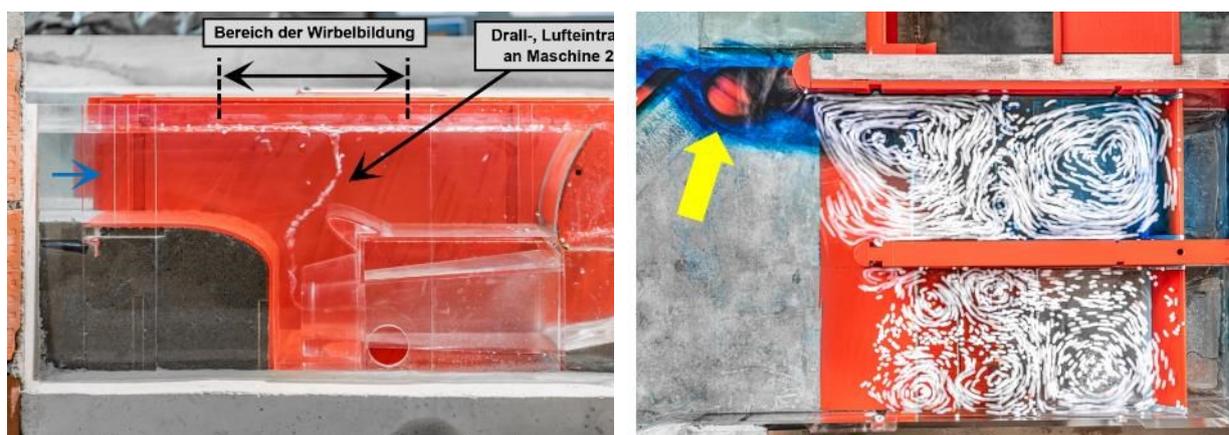


Abb. 4 Ausgangszustand mit Luftzopf, links, Wirbelbildung nach Optimierung, rechts (Fotos: Piki/TU Graz)

3.3 Sedimenttransport

Um die Strömungsgeschwindigkeiten für die in der Salzach natürlich vorkommenden rheophilen Fischarten möglichst hoch zu halten, wurde nach dem Vorbild des Kraftwerkes Lehen im Stadtgebiet Salzburg eine Rampe knapp oberwasserseitig des Kraftwerkes vorgesehen. Diese Rampe erhöht dauerhaft die Fließgeschwindigkeit im Stauraum und das Stauvolumen wird minimiert. Diese Situation wirkt sich auf die Transportvorgänge von Sedimenten im Hochwasserfall aus. Im Regelbetrieb sollten die Sedimente an günstigen Stellen abgelagert und im Spülfall über die Wehranlage abgeführt werden. Vor allem sollten keine Sedimente in den horizontalen Rechen eingetragen werden, da in die Turbineneinläufe gelangende Sedimente nur mit erheblichem Aufwand wieder entfernt werden können. Aus diesem Grund werden verschiedenste Lastfälle an und mit der Rampe durchgeführt und untersucht. Die ersten Versuche erfolgen am Modell mit fester Sohle, wobei Modellsedimente am oberen Modellrand zugegeben werden. Die folgende Abbildung 5 zeigt die Situation nach einem HQ100. Vor der Optimierung des oberwasserseitig gelegenen Einlaufbereiches werden erhebliche Sedimentmengen vor allem in den linken Turbineneinlauf eingetragen. Nach der Optimierung werden im Turbineneinlauf fast keine Sedimente mehr beobachtet (Abbildung 5, rechts).



Abb. 5 Links: Sedimenteintrag in die Turbineneinläufe Ausgangszustand (links) und Ausführungsvorschlag (rechts) nach einem HQ100 (Fotos: Piki/TU Graz)

Als Ergebnis kann die Form und Lage der Rampe so definiert werden, dass die Strömung über die Wehrfelder erfolgt und die Sedimente damit nicht in die Turbinen eingezogen werden (Abbildung 6, links). Die Situation wird insofern optimiert, als dass der oberwasserseitige Einlaufbereich adaptiert wird und als Lösung eine Anordnung von zwei parallelen Geschiebeleitschwellen gefunden werden konnte (Abbildung 6, rechts). Diese Ergebnisse sind qualitativ zu beurteilen, da die Sohle, wie gesagt, fixiert ist. Weitere Untersuchungen mit beweglicher Sohle sind notwendig und werden zurzeit noch durchgeführt. Dieser Versuche werden im Gegensatz zu den hier vorgestellten Tests instationär, sowohl hinsichtlich Abfluss als auch Sedimentfrachten durchgeführt. Erste Ergebnisse sind im Beitrag von Pirker und Schneider (2023) nachzulesen.



Abb. 6 Links: Hydraulische Strömungsverhältnisse mit der visualisierten Hauptströmung im Stauraum bei HQ1(n-0), beide Turbinenfelder offen; Rechts: Funktionsweise der Geschiebeleitschwellen zur Sedimentverfrachtung und Sedimentabwehr. Lastfall HQ100(n-0), (Fotos: Piki/TU Graz)

3.4 Brückenfreibord

Für die Erfassung des Freibords an den beiden Kraftwerksbrücken bzw. zur Bestimmung des erforderlichen Segmenthubes an den Wehrfeldern werden für die maßgebenden Hochwasserereignisse Wasserspiegelmessungen durchgeführt bzw. wird der vorhandene Freibord visuell beurteilt. Es hat sich gezeigt, dass für die vorgegebenen hydrologischen Kennzahlen (Abflüsse bei großen Jährlichkeiten) sowohl für die Krafthaus- als auch die Wehrbrücke kein ausreichendes Freibord vorhanden ist. Die fotografische Darstellung der Freibordsituation für ein rechnerisch

höchstes Hochwasser ist in Abbildung 7 dargestellt. Aus Basis der Messungen und der Beobachtungen wird schlussendlich vorgeschlagen, die Brückenunterkante bei beiden Brücken um 0,5 m anzuheben (nicht auf den Fotos ersichtlich).

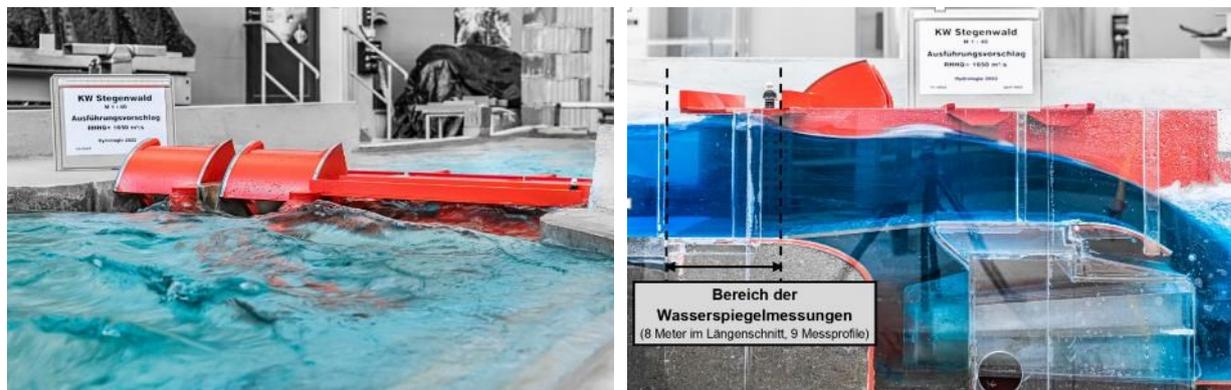


Abb. 7 Situation vom Freibord beim Lastfall RHHQ = 1650 m³/s, links: Ansicht der Krafthausbrücke vom Oberwasser, rechts: Freibord an der Krafthaus- und Wehrbrücke, Ansicht von Turbinenfeld 2, (Fotos: Piki/TU Graz)

4 Fazit

Dieser Artikel beschreibt Auszüge der Ergebnisse eines Modellversuches, der im Auftrag der VERBUND Hydro Power GmbH durchgeführt wurde. VERBUND und die Salzburg AG planen den Bau eines Kraftwerkes neuen Typs an der Salzach. Vertikale Kaplan-Turbinen werden horizontal installiert, um die Abmessungen des Krafthauses zu reduzieren. Die Einlaufrechen zu den beiden Turbinen werden dabei nahezu waagrecht eingebaut. Um den Sedimenteintrag in die Turbinenschächte zu minimieren, wird eine ökologisch notwendige Rampe in Form und Ausrichtung optimiert. Durch die Anordnung von zwei optimierten Geschiebeleitschwellen kann der Eintrag in die Turbinenschächte sehr stark reduziert werden. Die Untersuchungen hinsichtlich Rampe und Geschiebeeinzug sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Darüber hinaus wird in diesem Artikel die erfolgreiche Optimierung des Wehres und des Tosbeckens beschrieben. Die Überdeckung über dem Turbinenrechen ist vergleichsweise gering und dadurch ist die Gefahr eines Luftwirbels und Lufteinzuges in die Turbinen nicht unrealistisch. Dieses Problem wird durch die Gestaltung eines überströmten Trennpfeilers sowie der Position der Verschlussklappen in den Turbinenfeldern reduziert.

Literatur

Pirker, M., Schneider, J. (2023). Modellversuch zur Untersuchung des Nachkolkbereichs einer Sohlrampe im Stauraum des KW Stegenwald, 21. Wasserbau - Symposium, Wasserbau - krisenfest und zukunftsweisend, Wallgau, Deutschland.

Schneider, J., Piki, F.G., Badura, H. (2022). Physical model tests of a new run-of-hydro power plant with some special features, Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada, Spanien.

USBR. (1987). Design of Small Dams. Denver, CO: U. S. Bureau of Reclamation, USA.

Zenz, G., Schneider, J., Piki, F.G., Lazar, F. (2022). Hydraulischer Modellversuch Kraftwerk Stegenwald, unveröffentlichter Endbericht., Graz, Österreich.

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. Hannes Badura
VERBUND Hydro Power GmbH
Europaplatz 2, A-1150 Wien
hannes.badura@verbund.com

DI Franz Georg Piki
Ehemaliger Mitarbeiter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität
Graz
Aktuell: KELAG-Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft
Arnulfplatz 2
A-9020 Klagenfurt
Franzgeorg.Piki@kelag.at