

Vergleich von Modell und Original für klassische Optimierungsaufgaben von wasserbaulichen Modellversuchen

Arnd Hartlieb

Zusammenfassung

Anhand von zwei aktuellen Projektbeispielen, der Wasserkraftanlage Au an der Iller südlich von Kempten und der erweiterten Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Degerforsen am Fluss Ångermanälven in Schweden, werden wasserbauliche Modellversuche mit den realisierten Originalen verglichen. Für den Vergleich wurden drei klassische Optimierungsaufgaben für Modellversuche ausgewählt, die Kraftwerksanströmung und die Geschiebespülung am Beispiel Au sowie die Energieumwandlung am Beispiel Degerforsen. Insgesamt bestätigen die Beobachtungen an den Originalen die Ergebnisse aus den Modellversuchen in überzeugender Weise.

1 Ausgewählte Projektbeispiele

Für den Vergleich von Modell und Original werden zwei aktuelle Projekte herangezogen, die von 2014 bis 2015 errichtete Wasserkraftanlage Au an der Iller südlich von Kempten und die von 2012 bis 2014 erweiterte Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Degerforsen am Fluss Ångermanälven in Schweden.

1.1 Wasserkraftanlage Au an der Iller

An der Wasserkraftanlage Au an der Iller südlich von Kempten, die von einer gemeinsamen Gesellschaft der Allgäuer Überlandwerk GmbH und der Bayerischen Landeskraftwerke GmbH betrieben wird, erfolgt die Wasserkraftnutzung am rechten Ufer des Flusses in einem Kraftwerksgebäude mit zwei VLH-Turbinen (VLH für very low head). Bei einer Leistung von 900 kW beträgt der Ausbauabfluss $54 \text{ m}^3/\text{s}$ und die maximale Fallhöhe 2,35 m. Das schon vorher bestehende Querbauwerk in der Iller wurde in ein über 60 m breites Schlauchwehr zur Hochwasserabfuhr und ein 15 m breites Schlauchwehr mit tiefer liegender Wehrschwelle als Kiesschleuse zur Geschiebespülung umgebaut.

Das wasserbauliche Modell im geometrischen Maßstab 1:20 wurde nach dem Modellgesetz von Froude betrieben, da wie so häufig bei wasserbaulichen Fragestellungen die Trägheits- und Schwerkkräfte die zu simulierenden Strömungsvorgänge dominierten. Es umfasste die gesamte Anlage und einen Illerabschnitt, der etwa 90 m oberhalb der Anlage begann und etwa 140 m unterhalb endete.

Abb. 1 zeigt die gesamte Anlage in Modell und Original vom Unterwasser.



Abb. 1 Wasserkraftanlage Au an der Iller in Modell und Original vom Unterwasser

1.2 Erweiterte Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Degerforsen

Wie aktuell bei vielen Talsperren in Schweden bestanden auch an der von der E.ON Vattenkraft Sverige AB betriebenen Talsperre Degerforsen aufgrund der neu festgelegten Jährlichkeit und des neu berechneten Absolutwerts des Bemessungsabflusses Defizite bei der Abflussleistung der Hochwasserentlastungsanlage. Die vorhandene Abflussleistung unter Einhaltung des Stauziels betrug mit $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ nur etwa zwei Drittel des neuen Bemessungsabflusses von $2065 \text{ m}^3/\text{s}$. Zur Steigerung der Abflussleistung wurde die zwischen den vorhandenen drei Wehrfeldern der Hochwasserentlastungsanlage und dem Kraftwerksgebäude bestehende aufgeständerte Rinne für die Holztrift, die nicht mehr benötigt wird, zurückgebaut und durch ein zusätzliches Wehrfeld mit einem Drucksegment als Verschluss ersetzt.

Das Froudemodell im geometrischen Maßstab 1:40 enthielt neben der gesamten Hochwasserentlastungsanlage das Kraftwerksgebäude sowie den Stauraum auf einer Länge von etwa 250 m und einen etwa 280 m langen Unterwasserabschnitt.

Abb. 2 zeigt die Anlage im ursprünglichen Zustand des Originals und im Ausgangszustand des Modells mit dem bereits eingebauten vierten Wehrfeld vom Unterwasser.



Abb. 2 Talsperre Degerforsen im ursprünglichen Zustand des Originals und im Ausgangszustand des Modells mit dem bereits eingebauten vierten Wehrfeld vom Unterwasser

2 Vergleich von Modell und Original

2.1 Kraftwerksanströmung

Die ablösungs- und wirbelfreie Anströmung von Wasserkraftanlagen mit möglichst homogener Geschwindigkeitsverteilung in maßgebenden Querschnitten stellt eine klassische Optimierungsaufgabe für wasserbauliche Modellversuche dar. Für den Fall ausreichend großer Weberzahlen im Froudemodell können Maßstabeffekte durch die im Modell überrepräsentierte Oberflächenspannung des Wassers beispielsweise bei der Wirbelbildung weitgehend vermieden werden. Eine Übertragung der Versuchsergebnisse auf das Original ist dann ohne Einschränkungen möglich.

Als maßgebender Lastfall für die Kraftwerksanströmung wurde im Modellversuch für die Wasserkraftanlage Au an der Iller der Mittelwasserabfluss $MQ = 46,9 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt, der gleichmäßig auf beide Turbinen aufgeteilt ist. Der Oberwasserstand in diesem Lastfall liegt bei 689,00 müNN und der Unterwasserstand bei 686,68 müNN. Im Ausgangszustand der Planung trat bei der Anströmung der am rechten Flussufer angeordneten Turbinen oberhalb der linken Turbine eine stark ausgeprägte Strömungsablösung am Kopf des Trennpfeilers zur Kiesschleuse auf. Dagegen wurde die rechte Turbine ohne Strömungsablösung am Mittelpfeiler zwischen beiden Turbinen und ohne erkennbare Turbulenzen angeströmt. Im anschließenden Optimierungsprozess wurden der Mittelpfeiler zwischen den beiden Turbinen bis zur Rechenebene am oberen Ende des Kraftwerkseinlaufs verlängert und dort weitere vier Einlaufpfeiler mit teilweise unterschiedlicher Ausrichtung angeordnet. Dadurch wird die Strömungsablösung am Trennpfeiler unterbunden und eine wesentlich homogenere Anströmung der linken Turbine erreicht. Abb. 3 zeigt die Anströmungssituation im maßgebenden Lastfall für den Ausgangszustand und den optimierten Zustand.

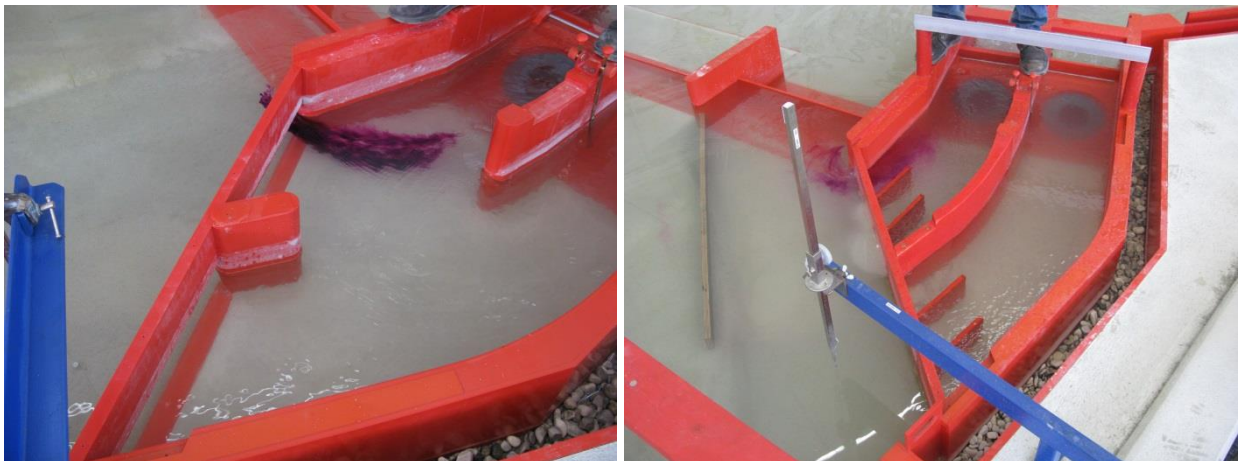


Abb. 3 Kraftwerksanströmung im maßgebenden Lastfall für den Ausgangszustand (links) und den optimierten Zustand (rechts)

Wie im Ausgangszustand treten auch im optimierten Zustand lokale Einlaufwirbel an den beiden Turbinen auf, die im Modell durch kalibrierte Drosselblenden simuliert wurden.

Zur quantitativen Beurteilung der Anströmung wurden im maßgebenden Lastfall die horizontalen Geschwindigkeiten in einer vertikalen Messebene im Zulauf zu den beiden Turbinen, aber noch oberhalb der lokalen Einlaufwirbel, in einem engen Raster mit einem Mikroflügel aufgenommen.

In Abb. 4 sind die entsprechenden, auf Originalgeschwindigkeiten umgerechneten Geschwindigkeitsverteilungen mit Blick in Fließrichtung für den Ausgangszustand und den optimierten Zustand dargestellt.

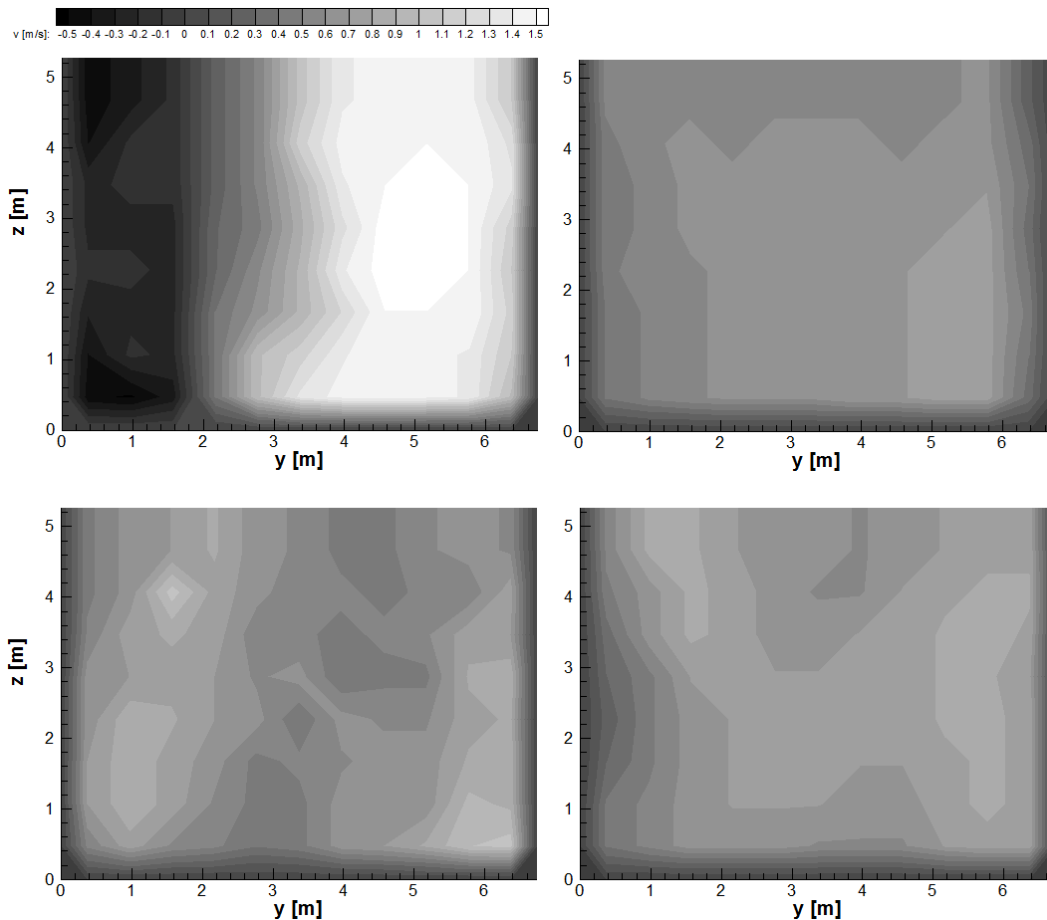


Abb. 4 Auf Originalgeschwindigkeiten umgerechnete Geschwindigkeitsverteilungen im maßgebenden Lastfall in einer vertikalen Messebene im Zulauf zu den beiden Turbinen für den Ausgangszustand (oben) und den optimierten Zustand (unten)

Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen bestätigen in sehr deutlicher Weise die visuelle Beurteilung. Im Ausgangszustand zeigt die Geschwindigkeitsverteilung vor der linken Turbine eine mit der Strömungsablösung am Trennpfeilerkopf korrespondierende ausgeprägte und großräumige Geschwindigkeitsspitze in der rechten Hälfte des Messquerschnitts und eine Rückströmung am Trennpfeiler. Dagegen ist die Geschwindigkeitsverteilung vor der rechten Turbine ausgesprochen homogen und annähernd ideal. Im optimierten Zustand sind vor der linken Turbine die Inhomogenitäten in der Geschwindigkeitsverteilung stark reduziert und fast vollständig verschwunden. Die Geschwindigkeitsverteilung vor der rechten Turbine bleibt weitgehend unverändert und somit sehr homogen.

Im Original wurde der optimierte Zustand des Modellversuchs exakt umgesetzt. Die visuelle Beurteilung der Anströmung im maßgebenden Lastfall bestätigt den Modellversuch. Auch im Original kommt es zu keiner Strömungsablösung am Kopf des Trennpfeilers zur Kiesschleuse. Abb. 5 zeigt die generell homogene Anströmung der beiden Turbinen und die lokalen Einlaufwirbel an den beiden Turbinen, die so auch im Modell zu beobachten waren.



Abb. 5 Anströmung der beiden Turbinen im Original für den maßgebenden Lastfall (Blick entgegen der Fließrichtung, links: in Fließrichtung rechte Turbine)

2.2 Geschiebespülung

Unter bestimmten Voraussetzungen, die im ausgewählten Projektbeispiel erfüllt werden, sind physikalische Froudemodelle ohne Überhöhung und Verwendung von Ersatzmaterial mit geringerer Dichte zur Simulation von Geschiebetransportvorgängen in einer Strömung sehr gut geeignet. Die quantitative Übertragbarkeit auf das Original ist dann gegeben, wenn bei maßstäblicher Wiedergabe der Geschiebedurchmesser und gleicher Materialdichte ausreichend große Korn-Reynoldszahlen im Modell vorhanden sind. Dann ist die Zähigkeitskraft bei der Kornumströmung im Modell genauso wie im Original im Gegensatz zur Trägheits- und Schwerkraft vernachlässigbar. Im Vergleich dazu ist die numerische Simulation von dreidimensionalen Geschiebetransportvorgängen aufgrund des Charakters einer Zweiphasenströmung immer noch Gegenstand der Forschung.

Im ausgewählten Projektbeispiel der Wasserkraftanlage Au war neben der Kraftwerksanströmung auch die Optimierung der Geschiebespülung über die neben dem Kraftwerk angeordnete Kiesschleuse eine wesentliche Aufgabe des Modellversuchs. Die besondere Herausforderung bestand darin, trotz der geringen Fallhöhe eine zuverlässige und effiziente hydraulische Geschiebespülung des Bereichs oberhalb des Kraftwerkseinlaufs zu ermöglichen und damit den Eintrag von Geschiebe in das Kraftwerk zu verhindern. Wie die Kornverteilungskurven in Abb. 6 zeigen, wurde mit dem verwendeten Modellsand bei dem gewählten geometrischen Maßstab 1:20 das Spektrum des natürlichen Sohlmaterials der Iller zwischen Grund- und Deckschicht repräsentativ erfasst.

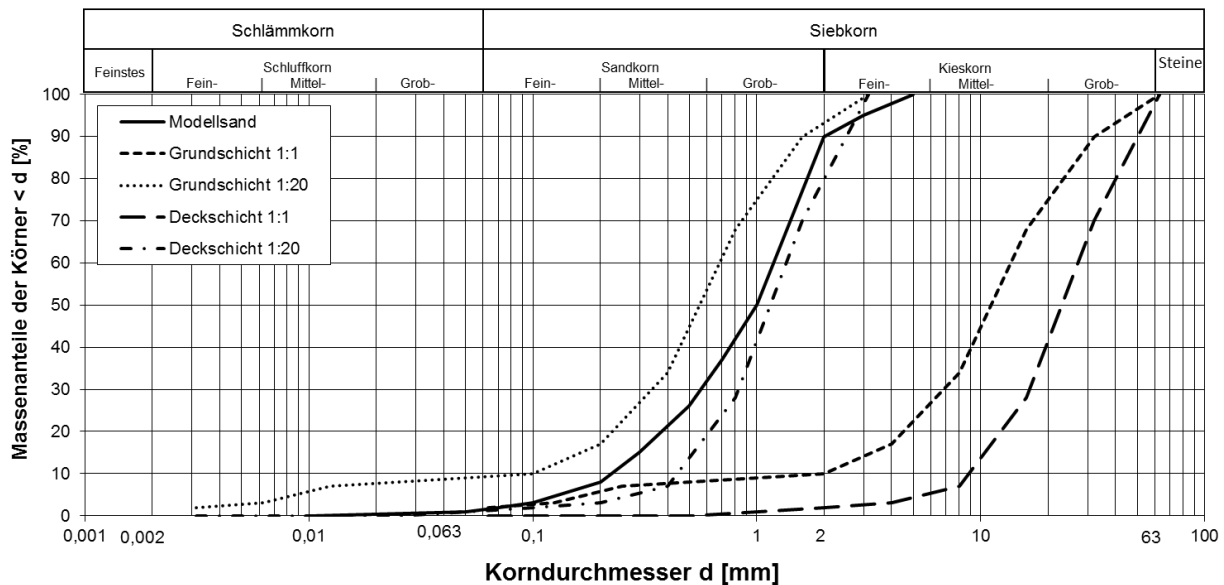


Abb. 6 Kornverteilungskurven des verwendeten Modellsands sowie der Grund- und Deckschicht des natürlichen Sohlmaterials der Iller im Original und im Maßstab 1:20

Zur Überprüfung der Spülwirkung der Kiesschleuse im Modell wurde bei allen untersuchten Varianten das identische Vorgehen gewählt. Im Bereich oberhalb des Kraftwerks und der Kiesschleuse wurde im Trockenen eine extreme Verlandung mit dem Modellsand über der festen Modellsohle eingebaut. Die horizontale Oberkante des Verlandungskörpers lag auf der gleichen Höhe wie die Sohle des Kraftwerkseinlaufs in der Rechenebene. Anschließend wurde das Modell bei geschlossenem Kraftwerk und Wehrfeldern sehr langsam mit Wasser befüllt, um modellbedingte Umlagerungen im Verlandungskörper zu vermeiden. Bei Erreichen der korrekten hydraulischen Randbedingungen (Abfluss $MQ = 46,9 \text{ m}^3/\text{s}$, zugehöriger Unterwasserstand $686,68 \text{ müNN}$) wurde der Modellverschluss der Kiesschleuse, eine vertikale Stauwand anstatt eines Schlauchwehrs, vollständig entnommen und damit der Stau gelegt. Der Spülversuch dauerte so lange an, bis der verbleibende Verlandungskörper einen unveränderlichen Endzustand erreicht hatte. Danach wurde das Modell langsam entwässert und der verbleibende Verlandungskörper als Indiz für die Spülwirkung dokumentiert.

Im Ausgangszustand der Planung waren keine konstruktiven Maßnahmen zur Verbesserung der Spülwirkung der Kiesschleuse enthalten. Trotzdem ist im Modell der Geschiebeaustrag im Nahbereich des Verschlusses unmittelbar nach Öffnung der Kiesschleuse erwartungsgemäß groß. Allerdings nimmt die Spülwirkung sowohl zeitlich als auch räumlich stark ab. Der Geschiebeaustrag kommt schon nach 45 min Spüldauer (Originalzeit) zum Erliegen und ein großer Teil der Verlandung oberhalb des Kraftwerks wird nicht mobilisiert. Die Spülwirkung der Kiesschleuse wurde im Ausgangszustand der Planung deshalb als nicht ausreichend erachtet. Am Ende eines längeren Optimierungsprozesses mit mehreren Varianten kristallisierte sich eine Leitwand als beste Lösung zur Verbesserung der Spülwirkung der Kiesschleuse heraus. Sie setzt am Pfeilerkopf zwischen Kiesschleuse und Schlauchwehr zur Hochwasserabfuhr an, ist $23,5 \text{ m}$ lang und verläuft in einem Abstand von $10,7 \text{ m}$ parallel zur Rechenebene des Kraftwerkseinlaufs. Die Oberkante der Leitwand ist horizontal und liegt $0,5 \text{ m}$ unter dem minimalen Stauziel. Bei einer Spülung in diesem Zustand verbleibt nur eine sehr kleine Restverlandung. Die gravierende Verbesserung der Spülwirkung durch die Leitwand ist darauf zurückzuführen, dass ein Großteil des

Abflusses auf den Bereich zwischen Leitwand und Rechenebene des Kraftwerkseinlaufs konzentriert bleibt und die Fließgeschwindigkeit dort im Gegensatz zum Ausgangszustand auch mit größerem Abstand von der Kiesschleuse hoch gehalten werden kann. Außerdem sorgt der Wechselsprung, der unterhalb der überströmten Leitwand entsteht, durch die hohe Turbulenz für eine Materialmobilisierung. In zusätzlichen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Leitwand die Kraftwerksanströmung nicht verschlechtert und bei großen Hochwasserabflüssen den Oberwasserstand nicht erhöht. Abb. 7 zeigt für den Ausgangszustand der Planung und den optimierten Zustand mit Leitwand die Verlandungssituation vor und nach der Spülung.



Abb. 7 Verlandung oberhalb des Kraftwerks vor (links) und nach der Spülung (rechts) für den Ausgangszustand der Planung (oben) und den optimierten Zustand mit Leitwand (unten)

Die Leitwand wurde im Original entsprechend dem optimierten Zustand errichtet. Abb. 8 zeigt die Strömungssituation im Modell während der Spülung mit $MQ = 46,9 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Original in einem Bauzustand mit etwas geringerem Abfluss, bei dem die geöffnete Kiesschleuse als Baustellenumleitung fungierte. Eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Original lässt sich bei der Überströmung der Leitwand mit dem unterhalb auftretenden Wechselsprung beobachten, der wesentlich für die Mobilisierung von verlandetem Geschiebe ist. Auch die anschließende Strömungssituation zwischen Leitwand und Rechenebene des Kraftwerkseinlaufs, die durch hohe Fließgeschwindigkeiten gekennzeichnet ist, stellt sich im Original ähnlich dar wie im Modell. Ins Auge fallen allerdings beim Original im Gegensatz zum Modell die Bereiche mit „Weißwasser“, die infolge der in Relation zur Trägheitskraft kleineren Oberflächenspannung durch stärkeren Lufteintrag entstehen. Dadurch wird die Strömungssituation aber nicht maßgeb-

lich verändert. Der größte Unterschied zwischen Modell und Original ist in der Strömung gegeben, die in Fließrichtung rechts am Leitwandkopf vorbeigeführt wird. Während hier im Modell kein Wechselsprung auftritt, ist dies im Original der Fall. Der Grund ist eine lokale Gefällestufe an dieser Stelle, die erst beim Bau erkannt und deshalb im Modell nicht berücksichtigt wurde. Falls diese Gefällestufe von dauerhaftem Bestand ist und durch rückschreitende Erosion keine Gefahr für die Pfeiler der oberhalb gelegenen Betriebsbrücke darstellt, sorgt sie durch die zusätzlichen Turbulenzen sogar noch für eine Verstärkung der Spülwirkung. Im Normalbetrieb des Kraftwerks ist die Gefällestufe eingestaut und ohne Auswirkung auf die Kraftwerksanströmung.



Abb. 8 Strömungssituation im Bereich der Leitwand bei geöffneter Kiesschleuse in Modell und Original

2.3 Energieumwandlung

Durch die sehr großen Reynolds- und Weberzahlen der abzubildenden Strömungszustände ist die Energieumwandlung an Wehr- und Hochwasserentlastungsanlagen prädestiniert für die Simulation in physikalischen Froudemodellen, in denen dann immer noch große Reynolds- und Weberzahlen die Vernachlässigung der Zähigkeitskräfte und der Oberflächenspannung erlauben. Für klassische Lösungen wie konventionell bemessene Tosbecken sind Modellversuche nicht zwingend erforderlich. Fast unabdingbar sind sie für spezielle Lösungen, bei denen etwa nicht die konzentrierte Energieumwandlung als vielmehr „nur“ die sichere Ableitung des Abflusses in Verbindung mit der Minimierung des Aufwands im Vordergrund steht. Um ein solches Beispiel handelte es sich bei der Erweiterung der Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Degerforsen. Durch die geologischen Verhältnisse mit stabilem Fels im Unterwasserbereich der Talsperre war schon bei der bestehenden Anlage kein Tosbecken vorhanden, sondern ein stufenloser Übergang von den Wehrrücken auf die Felssohle. Für das zusätzliche vierte Wehrfeld wurde vom Planer ebenfalls kein Tosbecken vorgesehen. Stattdessen sollte einerseits eine für die gesamte Anlage, aber insbesondere eine für das benachbarte Kraftwerksgebäude und den Dammfuß der Talsperre gefahrlose Ableitung des Hochwasserabflusses erreicht werden. Andererseits sollte die mit massivem Felsausbruch verbundene Aufweitung unterhalb des vierten Wehrfelds so kurz wie möglich gestaltet werden. Am Ende der Optimierung im Modell stand eine Lösung mit einer 6,5 m hohen schrägen Leitwand am rechten Ufer, die kurz unterhalb des Wehrfelds beginnt, durch die starke Richtungsänderung mit etwa 42 m Länge relativ kurz ist und als entscheidendes Element eine geneigte Überdachung besitzt (siehe Abb. 9).



Abb. 9 Optimierte Lösung mit der schrägen, überdachten Leitwand im Unterwasser des zusätzlichen vierten Wehrfelds in Modell und Original

Die beiden maßgebenden Bemessungsfälle für die Optimierung der erweiterten Hochwasserentlastungsanlage waren die Vollbeaufschlagung aller vier Wehrfelder mit dem neuen Bemessungsabfluss von $2065 \text{ m}^3/\text{s}$ (LF1) und die Vollbeaufschlagung nur des zusätzlichen Wehrfelds mit $750 \text{ m}^3/\text{s}$ bei geschlossenen anderen Wehrfeldern (LF2). Abb. 10 zeigt das Modell in beiden Lastfällen.



Abb. 10 Optimierte Lösung im Modell für LF1 (links) und LF2 (rechts)

In beiden Lastfällen wird der Abflussstrahl durch die Richtungsänderung der Leitwand nach oben gedrängt und prallt dort auf die geneigte Überdachung, die er nicht überspringen kann, sondern von dort als Wurfstrahl im 90° -Winkel zur Ausgangsfließrichtung nach links geworfen wird. Der Strahl „landet“ in der Mitte des bisherigen Unterwasserbereichs auf stabilem Fels und stellt dort keine Gefahr mehr dar. Im Wurfstrahl findet als positiver Nebeneffekt auch noch ein beträchtlicher Energieabbau statt.

Nach der Realisierung dieser Lösung im Original wurde das zusätzliche Wehrfeld am 15.09.2015 beim Auftreten eines Hochwasserabflusses einem ersten großen Belastungstest entsprechend LF2 unterzogen. Die mit einem Drohnenvideo dokumentierte Strömungssituation entsprach sehr genau den Beobachtungen im Modellversuch und bestätigte diesen eindrucksvoll (siehe Abb. 11). Wie in Kap. 2.2 zeigt sich auch hier ein höherer Lufteintrag in die Strömung beim Original im Vergleich zum Modell. Auch die Bildung von Sprühnebel ist im Original stärker ausgeprägt, wobei dieser auch im Original nicht die Leitwand überwindet.

Der Betreiber der Anlage kommentierte die Beobachtungen mit der Aussage, dass man ohne den Modellversuch nicht diese hydraulisch voll funktionsfähige und kostengünstige Lösung gewagt hätte.



Abb. 11 Optimierte Lösung im Original (LF2)

Literatur

Hartlieb, A.; Sperer, A.; Rutschmann, P. (2014). Wasserkraftanlage Au an der Iller, Versuchsbericht Nr. 422, Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, unveröffentlicht.

Hartlieb, A.; Neisch, V.; Sperer, A.; Rutschmann, P. (2010). Spillway Degerforsen Dam, Versuchsbericht Nr. 409, Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, unveröffentlicht.

Anschrift des Verfassers

PD Dr.-Ing. habil. Arnd Hartlieb
Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München
Oberrach 59 1/3, D-82432 Walchensee
arnd.hartlieb@tum.de