

# Wehrregulierung zur Dämpfung des Hochwasserscheitels am Beispiel der Wehranlage Langkampfen am Inn

*Eva Lüke, David F. Vetsch, Marco Gerber und Robert Boes*

## Zusammenfassung

Die Retention von Scheitelabflüssen in Flussstrecken ist eine wichtige Massnahme zur Minderung des Hochwasserrisikos. Als Retentionsraum kann der frühzeitig abgesenkte Stauraum oberhalb eines Flusswehrs genutzt werden. Dafür ist eine angepasste, im Idealfall automatisierte Wehrsteuerung erforderlich. Die Herausforderung besteht darin, dass Stauräume oberhalb von Flusswehren meist ein relativ zur Abflussfracht geringes Volumen aufweisen, welches mit zunehmendem Abfluss zudem noch abnimmt. Dennoch kann unter gewissen Bedingungen durch die Retention im Fluss eine effektive Kappung des Scheitelabflusses erzielt werden. In diesem Beitrag wird anhand des Beispiels der Wehranlage in Langkampfen am Inn aufgezeigt, wie der Stauraum oberhalb des Wehrs zur Kappung der Abflussspitze genutzt werden kann. Für die Simulation des Ablaufs der Hochwasserwelle sowie für die Abbildung der Wehrsteuerung wird ein hydronumerisches 1D Modell erstellt. Wichtig sind hierbei die Kenntnis über die Charakteristik des Stauraums und die Abflusskapazität der Wehrverschlüsse. Ausserdem sind Vorgaben zum Freibord entlang der Stauhaltungsdämme während der Scheitelkappung zu berücksichtigen. Die durch das numerische Modell simulierte Scheitelkappung wird anhand von Hochwasserszenarien erprobt. Das Modell soll schliesslich nahezu in Echtzeit angewendet werden können, um die entsprechende Wehrregulierung im Hochwasserfall durch den Kraftwerksbetreiber zu ermöglichen.

## 1 Einleitung

Das Unterinntal erstreckt sich von Innsbruck (Tirol) bis nach Rosenheim (Bayern) und zeichnet sich durch eine dichte Besiedlung und daher auch durch ein hohes Gefährdungspotential im Hochwasserfall aus. Partiiell werden deklarierte Überflutungsflächen entlang des Inns zur Entlastung des Gerinnes genutzt. Durch die gezielte Überflutung von Vorländern kann der Retentionseffekt ausgenutzt und so der Scheitelabfluss gedämpft werden.

Zwischen Wörgl und Kufstein wurde 1998 das Kraftwerk Langkampfen in Betrieb genommen. Die mit dem Bau der Wehranlage verbundene Errichtung der Stauhaltungsdämme verursachte eine Abtrennung des Flusses von den Vorländern. Um einer Verschärfung der Hochwasserproblematik für die Unterlieger am Inn entgegenzuwirken, mussten Ersatzmassnahmen entwickelt werden. Die Auflagen aus dem Wasserrechtsverfahren sehen vor, die Abflussspitze ab Scheitelabflüssen von  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  zu kappen (Boes et al., 2004). Dies soll mithilfe einer angepassten Wehrsteuerung realisiert werden. Als Retentionsraum steht der Stauraum des Kraftwerks Langkampfen bereit.

Bei der Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken oder Flutpoldern wird im Allgemeinen so vorgegangen, dass die Grösse des Speichers anhand der Abflussfülle von Hochwasserwellen mit einer vorgegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit bemessen wird (Maniak, 2010). In diesem Fall ist es jedoch umgekehrt. Das potentielle Rückhaltevolumen in Form des abgesenkten Stauraums der Wehranlage Langkampfen ist bekannt, jedoch abhängig vom Abfluss (vgl. Abschnitt 4). Ziel ist es, auf Basis des bekannten Speichervolumens die maximal mögliche

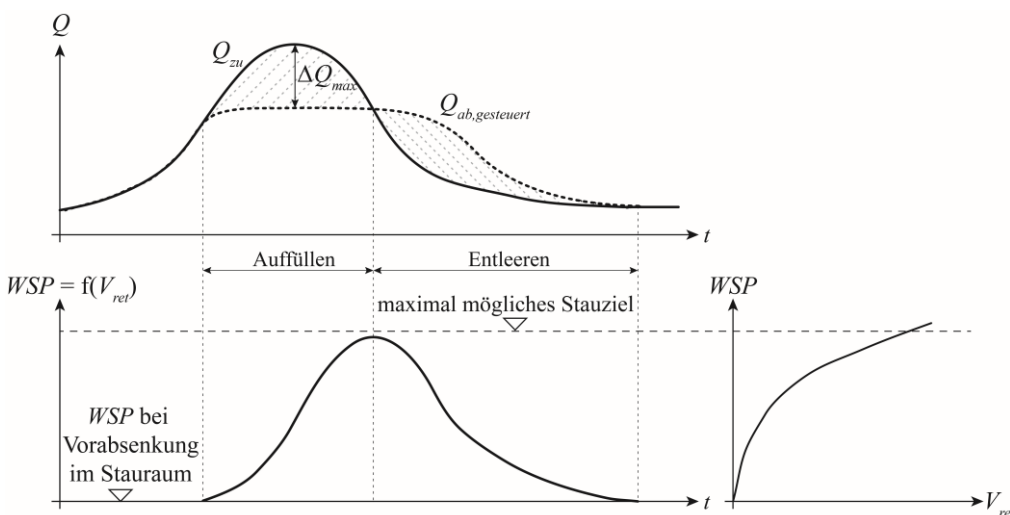
Dämpfung der Hochwasserabflussspitze zu erzielen, indem die Wehrverschlüsse entsprechend gesteuert werden. Dazu ist die Kenntnis über den Spitzenabfluss und über die Form der Hochwasserganglinie erforderlich. Mit einem hydronumerischen 1D Modell wird einerseits der Ablauf der Hochwasserwelle und damit der Zufluss zum Stauraum abgebildet und andererseits durch eine angepasste, im Modell implementierte Wehrsteuerung der Hochwasserscheitel der Zuflussganglinie gekappt.

## 2 Konzept der Scheitelkappung

Bei der Dämpfung von Hochwasserscheiteln wird die Retentionswirkung eines Speichers ausgenutzt. Wie stark der Scheitelabfluss abgemindert werden kann, hängt vom vorhandenen Rückhaltevolumen und der Form der Zuflussganglinie ab. Der Zufluss  $Q_{zu}$  zum Speicher wird um  $\Delta Q$  reduziert. Mithilfe einer Abflussregulierung, z.B. durch die Steuerung einer Wehrschütze, soll während der Scheitelkappung der Abfluss  $Q_{ab}$  möglichst konstant gehalten werden. Um das Hochwasserrisiko für die Anlieger zu verringern, ist es wünschenswert, eine starke Dämpfung zu erreichen, d.h.  $\Delta Q$  sollte möglichst gross sein. Eine interessante Grösse ist daher  $\Delta Q_{max}$  (Abb. 1). Die Differenz  $\Delta Q$  wird im Retentionsraum zwischengespeichert. Das Integral von  $\Delta Q$  über die Zeit ergibt das benötigte Rückhaltevolumen  $V_{ret}$ .

$$V_{ret} = \int \Delta Q dt \quad [1]$$

In Abb. 1 ist erkennbar, dass das benötigte Rückhaltevolumen sowohl von der Form der Zuflussganglinie als auch vom Abfluss aus dem Speicher abhängig ist. Bei einem lang andauernden Scheitel der Zuflussganglinie wäre die Fülle grösser als bei einem kurzen Scheitel. Die Form der Abflussganglinie kann durch die Steuerung des Regelorgans beeinflusst werden. Da das Rückhaltevolumen  $V_{ret}$  in der Regel begrenzt ist, muss schon vor dem Vorgang der Scheitelkappung die Zuflussganglinie zum Rückhalteraum bekannt sein.



**Abb. 1** Prinzip der Retention, wobei  $WSP$  die Wasserspiegellage,  $Q$  den Abfluss, und  $V_{ret}$  das Rückhaltevolumen bezeichnen.

Für die Berechnung der Scheiteldämpfung ist die Kenntnis weiterer Parameter erforderlich. Der Wasserstand im Retentionsraum gibt an, zu welchem Anteil der Speicher während der Kappung bereits gefüllt ist. Während des Füllvorgangs darf der Wasserstand das maximal

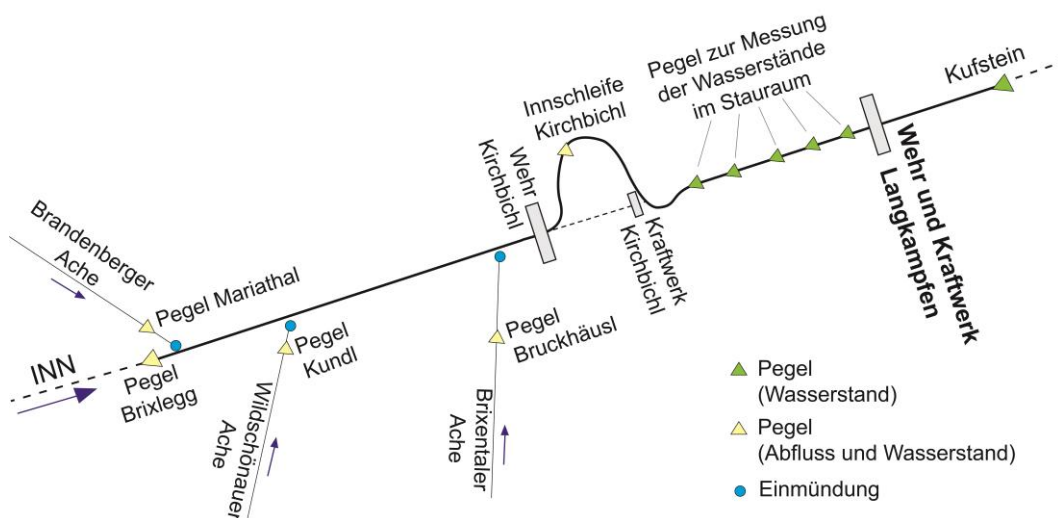
mögliche Stauziel nicht überschreiten (Abb. 1). Zudem beeinflusst der Wasserstand in Abhängigkeit der Hydraulik des Regulierorgans den Abfluss. Die Wasserstands-Volumen-Beziehung (Speicherinhaltslinie) sowie die Gleichung für den Abfluss aus dem Speicher sind zur Berechnung der Dämpfung und Optimierung der Kappung notwendig.

### 3 Numerisches 1D Modell

#### 3.1 Aufbau

Mit einem hydronumerischen 1D Modell soll zum einen das Ablauen der Hochwasserwelle im Inn bis zum Wehr und zum anderen die Wehrsteuerung von Langkampfen abgebildet werden. Dafür wurde das Modell *BASEMENT*, welches an der VAW entwickelt wird, angepasst. Beim 1D Modell wird der Flusslauf anhand von Querprofilen abgebildet. Die Strömungsberechnung erfolgt mittels der eindimensionalen Gleichungen von de Saint-Venant. Das Modell soll in Echtzeit Empfehlungen für die Stellungen der Wehrverschlüsse in Langkampfen ausgeben. Die Entscheidung fiel auf ein 1D Modell, da die Anforderungen an eine Echtzeitsimulation während des Hochwasserereignisses in Bezug auf Robustheit und Schnelligkeit sehr hoch sind.

Im numerischen Modell werden 28 Fluss-km oberhalb der Wehranlage Langkampfen anhand von Querprofilen mit einem mittleren Abstand von etwa 200 m abgebildet. Am oberen Modellrand befindet sich der Pegel Brixlegg, welcher als Referenzpegel verwendet wird. Die Abflussdaten dieses Pegels bilden den Zufluss am oberen Rand. Im Modell sind ausserdem noch die Inn-Zubringer Brandenberger Ache (von orografisch links) sowie Wildschönauer Ache und Brixentaler Ache (von orografisch rechts) zu berücksichtigen (Abb. 2). Diese Zuflüsse machen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil des Abflusses im System aus.



**Abb. 2** Schema des Modellgebiets von Brixlegg bis Kufstein mit den Hauptzuflüssen

Im Projektperimeter befinden sich ausserdem die Wehranlage und das Ausleitkraftwerk Kirchbichl, dessen Ausleitkanal die Innsschleife abschneidet (Abb. 2). Bei der Simulation von Hochwasserabflüssen, welche für die Aufgabenstellung massgeblich sind, wird der Aufstau in Kirchbichl nicht berücksichtigt, da die Staulegung zuvor erfolgt und der gesamte Abfluss durch die Innsschleife abgeleitet wird. Für die Wehranlage Langkampfen wird angenommen, dass am Wehr bei jedem Betriebszustand und jedem Abfluss ein Fließwechsel entsteht und die Wasserspiegellage unabhängig von den Abflussverhältnissen unterstrom ist (vollkommener

Abfluss). Der untere Modellrand liegt 1.13 km unterstrom der Wehranlage Langkampfen bei Kufstein.

### 3.2 Ablaufen der Hochwasserwelle

Gemäss Auswertung vergangener Hochwasserereignisse beträgt die Laufzeit der Hochwasserwelle von Brixlegg bis Langkampfen etwa 2.5 Stunden. Mit dem kalibrierten Modell kann das Ablaufen der Hochwasserwelle im System korrekt abgebildet werden. Bei der Simulation diverser Hochwasserereignisse wurde der Spitzenabfluss jedoch unterschätzt. Dies hängt damit zusammen, dass im Modellgebiet zwischen Brixlegg und Langkampfen kleinere Zubringer bisher nicht in die Simulation einflossen. Für diese kleineren Zuflüsse gibt es keine Pegelaufzeichnungen. Um die Abbildung des Zuflusses zum Stauraum Langkampfen zu verbessern, müssen die Teileinzugsgebiete der kleineren Zubringer mit berücksichtigt werden. Die Abflussspenden der kleinen Teileinzugsgebiete werden als Anteil der Abflussspende der Brixentaler Ache bestimmt. Mithilfe dieses Ansatzes konnte die Prognose des Zuflusses zum Stauraum Langkampfen, vor allem der Scheitelwert der Ganglinie, verbessert werden.

### 3.3 Wehrabfluss

Die Wehranlage Langkampfen hat drei Wehrfelder, welche mit Zugsegmenten mit aufgesetzter Klappe ausgestattet sind. Die Verschlüsse der drei Wehrfelder werden simultan gesteuert, sofern kein Störfall vorliegt. Die Klappen werden zur Feinregulierung verwendet. Steigt der Abfluss im Inn über die Ausbauwassermenge der Turbinen an, wird das überschüssige Wasser über die Klappen abgeführt. Das Betriebsstauziel wird dabei gehalten.

Bei kleineren Hochwasserabflüssen erfolgt zum Zweck der Stauraumpülung die Staulegung. Die Zugsegmente werden dann gehoben, wenn die Klappen vollständig gelegt sind. Für den Hochwasserfall sind die Betriebszustände i) freier Abfluss über die Wehrschwelle bei gehobener Zugsegmentenschütze und ii) Schützenabfluss bei teilgeschlossener Zugsegmentenschütze relevant. Im numerischen Modell erfolgt beim Wehr Langkampfen während der Simulation die Überprüfung, ob der Wasserspiegel durch die Zugsegmentenschütze beeinflusst ist oder nicht. Liegt der Fall i) vor, erfolgt die Abflussberechnung mit der Wehrgleichung nach Poleni:

$$Q = \frac{2}{3} \mu B \sqrt{2g} h_{ii}^{3/2} \quad [2]$$

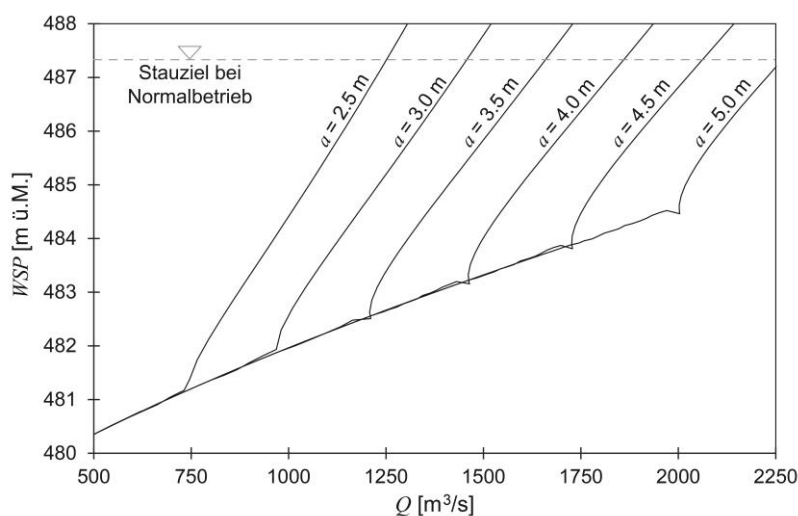
mit  $Q$  = Abfluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  
 $\mu$  = Überfallbeiwert [-],  
 $B$  = Wehrbreite [m],  
 $g$  = Erdbeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  
 $h_{ii}$  = Überfallhöhe bezogen auf die Wehrkrone [m].

Sobald die Zugsegmentenschütze in den Wasserspiegel eintaucht, liegt Fall ii) vor und der Abfluss wird gemäss Gleichung [3] berechnet. Zur Bestimmung der Abflusskapazität der Zugsegmente wurden an der Universität Innsbruck physikalische Modellversuche durchgeführt. Auf dieser Grundlage haben Boes et al. (2004) eine Gleichung für die Schützenabflussberechnung aufgestellt:

$$Q = \psi a B \sqrt{2g \left( H_{ii} - \frac{a}{2} \right)} \quad [3]$$

mit  $a$  = Schützenöffnung über der Wehrschwelle [m],  
 $\psi = 0.74 (a/H_{ii})^{-0.07}$  Abflussbeiwert [-],  
 $H_{ii}$  = Energiehöhe bezogen auf die Wehrschwelle [m].

Der Abfluss unter der Schütze ist abhängig von der Schützenöffnung  $a$  und der Wasserspiegellage  $WSP$  im Stauraum, bzw. der Energiehöhe  $H_{ii}$ . Anhand von Abb. 3 kann für einen beliebigen Wasserstand im Stauraum und Abfluss die erforderliche Schützenöffnung abgelesen werden.



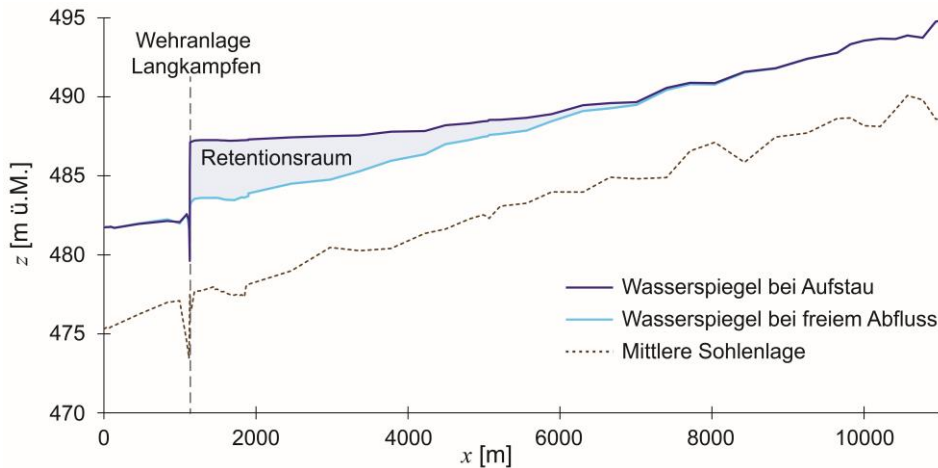
**Abb. 3** Wasserstands-Abflussbeziehung am Wehr Langkampfen in Abhängigkeit der Schützenöffnung  $a$

Für die automatische Wehrsteuerung im 1D Modell wird ein PID-Regler (*Proportional Integral Differential*) verwendet. Die Regulierung von Flusswehren wird häufig in Abhängigkeit der Wasserspiegellage durchgeführt. Dies ist auch bei dieser Problemstellung der Fall. Der Wasserspiegel stellt damit die sogenannte Regelgröße dar. Die Stellgröße ist die Schützenöffnung. Als Störgröße wirkt der Zufluss. Dieser wird als instationäres Störsignal im Retentionsraum wahrgenommen (Faeh, 2012). Der Regler ist zwischen Regelgröße und Stellgröße geschaltet. Die Regelgröße wird während des Regelvorgangs beobachtet und die Stellgröße so angepasst, dass der Zielwert der Regelgröße, also die geforderte Wasserspiegellage, erreicht wird. Mithilfe der Beziehung von Gleichung [3] kann daraufhin der Schützenabfluss bestimmt werden. Da die maximale Wasserspiegellage, also das Stauziel, im optimalen Fall nicht sofort, sondern erst gegen Ende des Kappungsvorgangs erreicht werden soll, muss eine Schliessgeschwindigkeit für die Schützen vorgegeben werden.

#### 4 Charakteristik des Stauraums

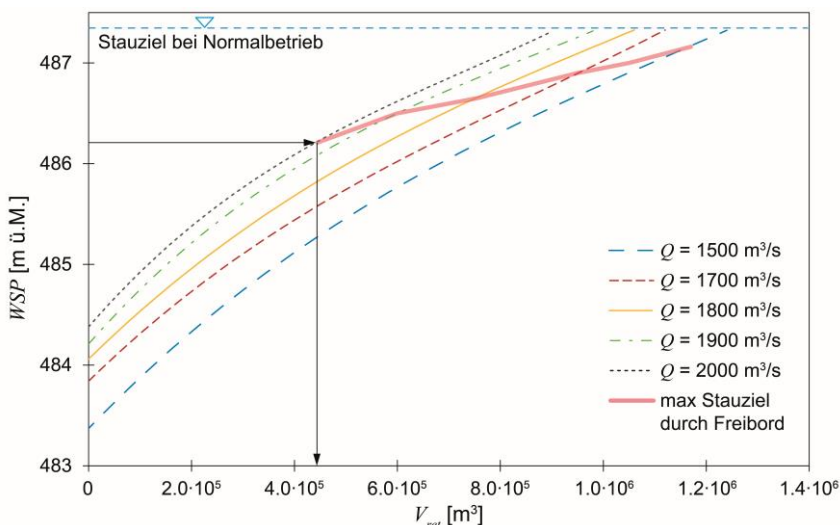
Bei Niedrigwasser besitzt der Stauraum eine Länge von 9 km und die Stauwurzel reicht bis zur Innschleife in Kirchbichl. Bei steigendem Abfluss verschiebt sich die Stauwurzel in Richtung der Wehranlage Langkampfen. Das potentielle Retentionsvolumen berechnet sich aus der Differenz zwischen dem durchflossenen Volumen bei Aufstau bis zum maximal möglichen

Stauziel und dem durchflossenen Volumen bei freiem Abfluss (Abb. 4). Dabei wird deutlich, dass das Retentionsvolumen abflussabhängig ist. Je höher der Zufluss zum Stauraum, desto höher steigt auch der Wasserspiegel bei freiem Abfluss und desto geringer ist das potentielle Retentionsvolumen. Eine zusätzliche Einschränkung des Retentionsvolumens entsteht durch die Freibordvorgabe. Der Stauraum im Bereich von etwa  $x = 4500$  m bis zum Wehr ist beidseitig durch Stauhaltungsdämme gesichert. In diesem Bereich ist ein minimales Freibord von 1 m stets einzuhalten.



**Abb. 4** Längenprofil des Retentionsraums von Langkampfen für einen stationären Abfluss von  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei Staulegung kann unter Einhaltung der Freibordvorgabe maximal  $2135 \text{ m}^3/\text{s}$  abgeführt werden. Während des Aufstaus verringert sich die Abflusskapazität. Abb. 5 zeigt die abflussabhängige Stauinhaltsbeziehung für den Stauraum und die Verringerung des potentiellen Retentionsvolumens durch Einhaltung der Freibordvorgabe. Bei einem Abfluss grösser als  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  steht nur noch ein sehr kleines Retentionsvolumen zur Verfügung, weshalb ab diesem Abfluss keine Kappung mehr empfohlen wird. Diese Abflussgrösse entspricht etwa einem  $HQ_{30}$  (Hanisch und Reisinger, 2013). Im Zustand ohne Kraftwerk wären die Vorlandflächen bei grösseren Hochwassern bereits im ansteigenden Ast der Ganglinie überflutet worden und der Retentionseffekt zum Zeitpunkt des Wellenscheitels vernachlässigbar klein ausgefallen. Insofern ahmt die technische Retention mittels Wehrsteuerung die Verhältnisse vor dem Kraftwerksbau in etwa nach.



**Abb. 5** Abflussabhängige Stauinhaltsbeziehung am Wehr Langkampfen und Restriktion des Rückhaltevolumens durch das Freibord an den Stauhaltungsdämmen

## 5 Szenarien der Scheitelkappung

### 5.1 Voraussetzungen für die Kappung

Die zuvor beschriebenen Untersuchungen zum Ablauf der Hochwasserwelle sowie zur Charakteristik des Retentionsraums und der Hydraulik der Schützen sind die Grundlage für die Wehrsteuerung während des Kappungsvorgangs. Es gibt zwei initiale Bedingungen, die vor Beginn der Scheitelkappung erfüllt sein müssen:

1. Der Stau ist gelegt und der Abfluss wird nicht mehr durch die Schützen beeinflusst.
2. Der prognostizierte Scheitelabfluss muss in dem Bereich liegen, in dem noch ein Aufstau erfolgen darf. Der Abfluss darf für eine Kappung 2000 m<sup>3</sup>/s nicht überschreiten.

Eine Herausforderung bei der Kappung liegt in der Festlegung des Startzeitpunkts für das Schliessen der Zugsegmentschützen. Untersuchungen durch Boes et al. (2004) haben ergeben, dass ein sinnvoller Startzeitpunkt etwa 2.5 Stunden vor Eintreffen des Hochwasserscheitels in Langkampfen ist. Diese Zeit entspricht der Wellenlaufzeit zwischen Brixlegg und Langkampfen. Es kann also dann die Kappung eingeleitet werden, wenn in Brixlegg erkennbar ist, dass dort bereits die Scheitelpassage erfolgt ist. Während des Kappungsvorgangs muss die Schütze mit geringer Geschwindigkeit möglichst gleichmässig abgesenkt werden, damit eine ausreichende Abflussreduktion erzielt wird.

### 5.2 Anforderungen an die Abflussprognose

Die Voraussetzungen, welche für den Beginn der Scheitelkappung erfüllt sein müssen, bringen Anforderungen an die Abflussvorhersage mit sich. Eine Staulegung in Langkampfen dauert etwa 12 bis 14 Stunden. Dies macht es erforderlich, auf mittel- bis längerfristige Abflussprognosen zurückzugreifen. Um im heutigen Betrieb rechtzeitig die Staulegung einleiten zu können, werden die Hochwasservorhersagen des Modells HoPI (Hochwasserprognose für den Tiroler Inn) verwendet. HoPI liefert Prognosedaten für einen Zeitraum von 48 Stunden für die Pegelstellen am Inn und die grossen Innzubringer. Einmal in der Stunde werden die prognostizierten Abflüsse neu berechnet und aktualisiert (Achleitner et al., 2011). Zudem müssen die prognostizierten Abflüsse von HoPI für das Wiedereintauchen der Schützen beobachtet werden. Eine Scheitelkappung soll erst beginnen, wenn die Hochwasserspitze den Pegel Brixlegg passiert hat. Die Aussage, ob die Spitze Brixlegg tatsächlich erreicht hat und der Abfluss nicht wieder ansteigt, wird anhand der Prognosedaten von HoPI getroffen.

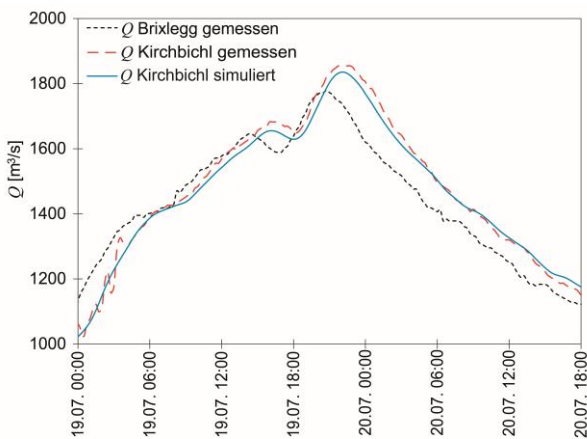
In den vergangenen Jahren gab es Hochwasserereignisse, die durch zwei Abflussspitzen geprägt waren. Dieser Fall stellt eine spezielle Situation da, denn der Retentionsraum von Langkampfen bietet kein ausreichendes Rückhaltevolumen, um beide Spitzen zu kappen. In einer solchen Situation kann nur der höhere Scheitelabfluss gekappt werden. Würde nach dem Vorgang der Kappung und dem Füllen des Retentionsraums der Abfluss nochmals ansteigen, müsste erneut langsam abgestaut werden. Dies kann aufgrund der Überlagerung mit dem Zufluss zu einer unerwünschten Erhöhung des Hochwasserabflusses führen. Um zu erkennen, dass eine Hochwasserganglinie mit zwei Abflussspitzen erwartet wird, ist ebenfalls das Prognose-Modell HoPI einzubeziehen.

### 5.3 Scheitelkappung am Beispiel des Hochwasserereignisses von 1987

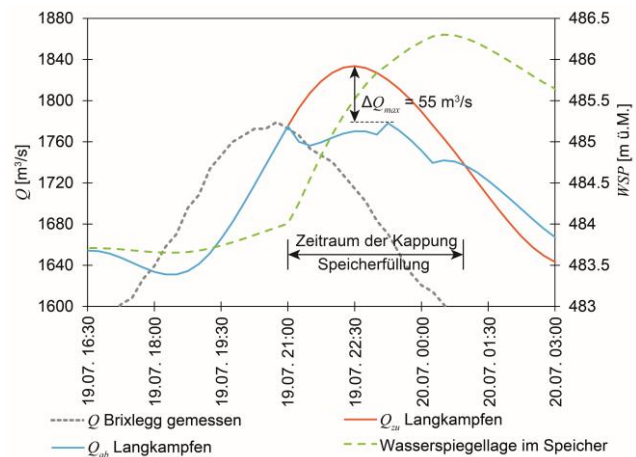
In diesem Abschnitt wird der Vorgang der Scheitelkappung am Beispiel des Hochwasserereignisses von 1987 erprobt. Die Hochwasserganglinie von 1987 weist zwei Abflussspitzen

auf (Abb. 6). Aus den zuvor erläuterten Gründen kann nur die höhere, in diesem Fall die zweite Spitze gekappt werden. Abb. 6 zeigt, dass der mit dem numerischen Modell simulierte Ablauf der Hochwasserwelle gut mit dem gemessenen Abfluss in Kirchbichl übereinstimmt. Der in Kirchbichl gemessene maximale Abfluss betrug  $1855 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach der aktuellen Statistik entspricht dies einem Abfluss mit einer Jährlichkeit von etwa 20 Jahren (Hanisch und Reisinger, 2013).

Mit dem Einfahren der Schützen wird begonnen, nachdem die zweite Abflussspitze Brixlegg passiert hat. Eine Herausforderung besteht nun in der Festlegung der initialen Eintauchtiefe. Über der Wehrschwelle stellt sich, aufgrund des Fliesswechsels vom Strömen zum Schiessen, die kritische Abflusstiefe ein. Ein zu schnelles und zu tiefes Eintauchen der Schütze zu Beginn des Kappungsvorgangs ist zu vermeiden. Es besteht die Gefahr, dass der Retentionsraum bereits gefüllt ist, wenn der Abflussscheitel Langkampfen noch nicht erreicht hat. Zum Startzeitpunkt der Kappung beträgt der berechnete Zufluss zum Wehr Langkampfen  $Q_{zu} = 1793 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei einer Wehrbreite von 54 m stellt sich damit eine kritische Abflusstiefe von 4.83 m ein. Die Wehrschwelle liegt auf 477.6 m ü.M., der Wasserspiegel in der Anströmung auf einer Kote von 482.47 m ü.M. Untersuchungen bei verschiedenen Szenarien ergaben eine sinnvolle Eintauchtiefe von etwa 0.3 m unterhalb der kritischen Abflusstiefe. Bei diesem Szenario wurde daher eine Schützenstellung mit der Kote der Unterkante von  $z = 482.15 \text{ m}$  ü.M. gewählt. Die Einschnürung des Überfallstrahls durch die Wehrpfeiler und das Widerlager wird in der Simulation vernachlässigt. Die kritische Abflusstiefe wird somit leicht unterschätzt. Auf diese Weise kann jedoch sichergestellt werden, dass auch im Fall einer Überschätzung des Zuflusses zum Wehr Langkampfen die Schütze zu Beginn der Kappung tief genug in den Wasserstrahl eintaucht, damit sich ein stabiler Abfluss unter der Schütze einstellt.



**Abb. 6** Abflussganglinien des Hochwasserereignisses im Juli 1987



**Abb. 7** Kappung des zweiten Abflussscheitels im Juli 1987

Nach dem Eintauchen wird unmittelbar eine Abflussreduktion erreicht (Abb. 7). Im Moment des Eintauchens entsteht der Wechsel zum Schützenabfluss und der Wasserspiegel im Reservoir steigt in der ersten Stunde rasch. Der Retentionsraum beginnt sich nun zu füllen. Die Schütze muss für einen möglichst gleichmässigen Abfluss bei weiter steigendem Zufluss nach und nach mehr geschlossen werden. Für eine stabile Simulation sollte dem Regler im Modell eine Schliessgeschwindigkeit für die Schütze vorgegeben werden. Eine sinnvolle Schliessgeschwindigkeit wurde für dieses Ereignis zu  $0.18 \text{ m/h}$  ermittelt. Die Mechanik der Zugsegmente erlaubt keine kontinuierliche Absenkung. Vielmehr erfolgt das Schliessen der Segmente



stufenweise in Schritten von 5 cm. Bei der vorgegebenen Schliessgeschwindigkeit gibt es alle 17 Minuten einen Schliessimpuls. Dadurch entsteht ein leicht unsteter Verlauf der gedämpften Abflussganglinie (Abb. 7).

Der Vorgang der Scheitelkappung dauert in diesem Fall 4 Stunden. Nach dieser Zeit wird die Schütze nicht mehr weiter geschlossen sondern verharrt in der Schlussstellung. Mit dem Eintauchen der Schützen kann bei einer Abflussganglinie, wie sie 1987 gemessen wurde, eine Abflusskappung von  $\Delta Q_{max} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$  erzielt werden. Der Wasserspiegel steigt während des Füllvorgangs bis auf die Kote von  $z = 486.3 \text{ m}$  ü.M. an. Gemäss Stauinhaltsbeziehung wäre ein Aufstau bis  $z = 486.5 \text{ m}$  ü.M. möglich (Abb. 5), damit das Freibord an den Stauhaltungsdämmen noch gerade eingehalten würde. Das vorhandene Retentionsvolumen ist damit nahezu ausgeschöpft. Nach dem Kappungsvorgang wird der Wasserspiegel im Stauraum allmählich wieder abgesenkt, indem die Zugsegmenteschützen wieder langsam gehoben werden. Ein zu schnelles Heben der Schützen ist zu vermeiden, da sonst ein Schwall im Unterwasser entstünde und dadurch der Abfluss abrupt ansteigen würde.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die numerischen Untersuchungen am Wehr Langkampfen am Inn zeigen, dass eine Scheitelkappung während eines Hochwassers durch eine angepasste Wehrsteuerung möglich ist. Die Abflussreduktion durch die Wehrsteuerung stellt eine kostengünstige Möglichkeit der Verbesserung der Hochwassersituation bis zu 30-jährlichen Hochwasserabflüssen dar. Dies setzt allerdings voraus, dass es nicht zu Problemen am Wehr kommt, beispielsweise mit Schwemmholtzanprall oder Verklausungen.

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung ist deshalb die Vorgehensweise bei Störfällen zu betrachten. Im Modell ist vor und während der Scheitelkappung stets zu überprüfen, ob ein Störfall vorliegt. Wird während des Füllvorgangs des Retentionsraums ein Störfall festgestellt, darf mit der Kappung nicht weiter fortgefahren werden. Vielmehr werden die Zugsegmente wieder allmählich gehoben, um einen Überstau im Retentionsraum zu vermeiden. Gleichzeitig darf der Abfluss nicht künstlich erhöht werden. Solch ein Störfall kann beispielsweise ein Verklemmen eines Zugsegments sein, welches sich in Folge dessen nicht mehr steuern liesse. Auch ein zu hoher Anstieg des Wasserspiegels im Retentionsraum muss ein Stoppen der Kappung bewirken, da die Gefahr besteht, dass das Freibord an den Stauhaltungsdämmen nicht mehr eingehalten wird. Bei einem Störfall soll die Simulation beim Vorgehen zum Öffnen der Zugsegmente unterstützend wirken.

Für die frühen Sommermonate 2016 ist vorgesehen, den Prototyp des Modells am Wehr Langkampfen in Echtzeit zu testen. Dabei soll ein kleinerer Hochwasserabflussscheitel mit der angepassten Wehrsteuerung gekappt werden. Die Anforderungen an den Regler können damit am Prototyp überprüft werden.

## Danksagung

Die VAW bedankt sich bei der TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG für den Auftrag zu dieser numerischen Modelluntersuchung und für die gute Zusammenarbeit. Dieses Projekt ist in das *Swiss Competence Center for Energy Research - Supply of Electricity (SCCER-SoE)*, Teilbereich Wasserkraft, eingebettet.

## Literatur

- Achleitner, S.; Schöber, J.; Rinderer, M.; Schöberl, F.; Kirnbauer, R.; Schönlaub, H. (2011): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology*, 2012(412-413), 90-100
- Boes, R.M.; Reindl, R.; Stöger, F. (2004): Hochwasserretention durch Vorabsenkung in Flusstauräumen: Fallbeispiel vom Tiroler Inn. Proc. Symposium „Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie“, Bericht 100, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München: 34-43
- Faeh, R. (2012): Numerische Modellierung von Fließgewässern, Vorlesungsmanuskript Version HS 2012. Professur für Wasserbau, ETH Zürich
- Hanisch, P.; Reisinger, S. (2013): Kraftwerk Kirchbichl – Erweiterung: Naturgefahren. Projektbericht (unveröffentlicht), DonauConsult Ingenieurbüro GmbH, Wien, im Auftrag der TIWAG-Tiroler-Wasserkraft AG, Innsbruck
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2010

## Anschrift der Verfasser

**Eva Lüke** (korrespondierende Autorin)

Email: lueke@vaw.baug.ethz.ch

**Dr. David F. Vetsch**

**Marco Gerber**

**Prof. Dr. Robert Boes**

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

Hönggerberggring 26

8093 Zürich