Markus Larcher, Helmut Knoblauch, Günther Heigerth, Erich Wagner, Paul Stering

# Instationäre Füll- und Entleervorgänge bei der Auslegung der Oberkammer des Wasserschlosses Limberg II

#### Vorspann

Das Pumpspeicherwerk Limberg II der Kraftwerksgruppe Glockner-Kaprun nutzt die Höhendifferenz zwischen den beiden bestehenden Jahresspeichern Mooserboden und Wasserfallboden. Am Übergang zwischen dem Druckstollen und dem Druckschacht wird ein gedrosseltes Zweikammerwasserschloss errichtet, das in einem physikalischen Modellversuch (Maßstab 1:30) getestet wurde. In diesem Beitrag werden die instationären Füll- und Entleervorgänge behandelt, die bei der Auslegung der Oberkammer zu berücksichtigen waren.

Markus Larcher, Helmut Knoblauch, Günther Heigerth, Erich Wagner, Paul Stering

# Unsteady filling and draining cycles in designing the upper chamber of the surge tank Limberg II

#### **Abstract**

The pump storage hydro power plant Limberg II of the hydro power scheme Glockner-Kaprun will generate power using the difference in height between two reservoirs. A two-chamber surge tank will be built between the pressure tunnel and the pressure shaft. The design of this surge tank was checked by a hydraulic model test with a scale o 1:30. This article focuses on the unsteady filling and draining cycles which have to be considered in the design of the upper chamber of the surge tank.

# 1 Einleitung

Das derzeit im Bau befindliche Pumpspeicherwerk Limberg II nutzt die knapp 380 m Höhendifferenz zwischen den beiden bestehenden Jahresspeichern Mooserboden und Wasserfallboden. Die neue Anlage wird parallel zum bestehenden Pumpspeicherwerk Kaprun-Oberstufe errichtet und ergänzt bzw. optimiert die bestehenden Speicherkraftwerke Kaprun (seit 1955 in Betrieb). Die beiden Maschinensätze mit einer Leistung von je 240 MW im Turbinen- bzw. Pumpbetrieb erhöhen die Turbinenleistung der Speicherkraftwerke Kaprun von 353 MW auf 833 MW und die Leistungsaufnahme im Pumpbetrieb von 130 MW auf 610 MW. Der Ausbaudurchfluss beträgt im Turbinenfall 144 m³/s, im Pumpfall 103 m³/s.

#### 2 Wasserschloss

Übergang Am vom Druckstollen zum Druckschacht wird ein gedrosseltes Zweikammerwasserschloss mit durchflossener Unterkammer errichtet, wofür das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU-Graz umfangreiche numerische und physikalische Untersuchungen vorgenommen hat. Bei der Konfiguration des Wasserschlosses werden die Vorteile einer durchflossenen und in den Triebwasserstollen integrierten Unterkammer (Di = 9,0 m) umgesetzt. Die projektierte, einarmige Oberkammer mit einem konstanten Sohl- und Firstgefälle von 0,5% Richtung Schrägschacht, war in ihrer Lage und Höhe vordefiniert, wodurch sich eine Länge von 190 m ergibt. Eine weitere Vorgabe war die örtliche und richtungsmäßige Anordnung des Schrägschachtes (Di=5,2 m) in Verlängerung des gepanzerten Druckschachtes (Di = 4,8 m). Ursprünglich war eine hufeisenförmige Querschnittsform mit einem eingeschriebenen Innendurchmesser von 6,2 m vorgesehen. Im Bild 1 ist eine Systemskizze des geplanten Wasserschlosses dargestellt.

Wesentlichstes Kennzeichen einer in den Triebwasserweg integrierten Unterkammer gegenüber einer separierten Anordnung, ist das Erfordernis eines Stationärdurchflusses im tiefsten Abschwingfall bei gleichzeitigem Turbinenbetrieb. Für Extremzustände war ein Fließwechsel in der Unterkammer und ein damit verbundener Lufteintrag in den anschließenden Druckschacht zu vermeiden. Um einen gerade noch strömenden Freispiegeldurchfluss mit einer Wassertiefe von 4,2 m zu gewährleisten, war die Sohlneigung der Kammer Richtung Druckschacht mit 0,15 % begrenzt.

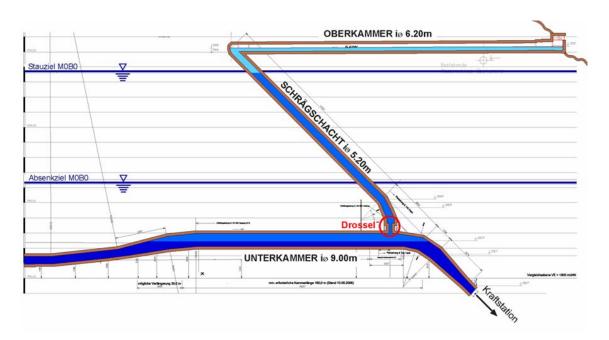


Bild 1: Systemskizze – Längeschnitt gedrosseltes Zweikammerwasserschloss mit durchflossener und integrierter Unterkammer

Am Übergang des Schrägschachtes zur Unterkammer wurde eine unsymmetrische Drosselblende mit einem Widerstandsverhältnis von ca. 1:2,2 angeordnet. Zur Vermeidung längerfristiger Kavitation unterhalb der Drossel wurde die geringere Verlusthöhe der unsymmetrischen Drosselblende in Abschwingrichtung angesetzt. Zur Sicherstellung einer Entlüftung der Kammer für den Dauerbetrieb wurde eine zusätzliche Entlüftungskonstruktion mit Zwischenanschlüssen vom Kammerende bis zum Steigschacht vorgesehen.

# 3 Physikalischer Modellversuch

Die instationären Untersuchungen wurden an einem physikalischen Vollmodell des Wasserschlosses im Maßstab 1:30 durchgeführt.

Folgende allgemeine Themen wurden behandelt:

- die Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Wasserschlosses bei instationären Schwingungszuständen,
- die Überprüfung der Drossel bei instationären Vorgängen,
- die hydraulische Überprüfung der Schwall- und Sunkvorgänge in der Unterkammer,
- die Überprüfung der Be- und Entlüftungsmaßnahmen der Unterkammer

Im Speziellen werden in diesem Artikel die folgenden Themen behandelt:

- die hydraulisch-konstruktive Optimierung der Oberkammer und
- die hydraulische Überprüfung der Schwall- und Sunkvorgänge in der Oberkammer.

Eine wesentliche Grundlage, neben den Erkenntnissen der Drosseluntersuchung, bildeten die Ergebnisse der 1D-numerischen Wasserschlossberechnung. Daraus wurden die Stollenund Maschinenganglinie als Eingangsdaten der Versuche herangezogen.

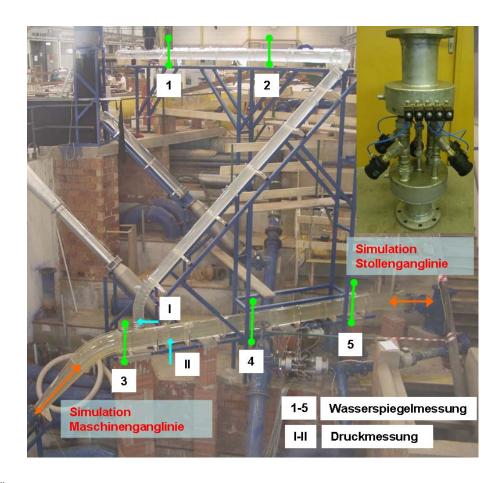


Bild 2: Übersichtsbild des Modellstandes – Vollmodell (M= 1:30)

# 4 Modellaufbau und Messeinrichtung

Das Vollmodell wurde nach dem Froudeschen Modellgesetz betrieben und überwiegend aus Plexiglas hergestellt. Die größte modelltechnische Herausforderung war die maßstäbliche Nachbildung der Stollen- und Maschinengangline, wozu eigene Zugabegeräte entwickelt wurden. Weiters war die Automatisierung bei der Nachbildung der Lastfallzyklen aus der numerischen 1D-Berechnung ein Schwerpunkt. Als Zugabegeräte wurden je Strömungsrichtung (d.h. in Summe vier) pneumatisch geregelte Ventilgruppen - mit maximal 6 Einzelventilen - verwendet.

Hauptaugenmerk bei der messtechnischen Erfassung der instationären Vorgänge wurde auf die Messung der Spiegelbewegungen in den Kammern gelegt. Gemessen wurden It. Bild 2:

- die Spiegelhöhen in der Unterkammer an drei Stellen mittels potentiometrischen Sonden,
  (3 5)
- die Spiegelhöhen in der Oberkammer an zwei Stellen mittels Ultraschall, (1 2)
- die Spiegelhöhen im Schacht sowie die Druckhöhe in der Unterkammer mittels
  Direktdruckaufnehmer (I II) und

 die Durchflüsse der Stollen und der Maschinenganglinie jeweils mittels induktiven Durchflussmesser (DN 150).

#### 5 Hydraulisch-konstruktive Gestaltung der Oberkammer

### 5.1 Ausgangssituation

Wie die Ergebnisse der 1D-numerischen Wasserschlossberechnung zeigten, war die Dauer des Entleerungsvorganges der ursprünglichen Oberkammer bei Extremlastfällen länger als die Zeitspanne vom Abreißen der Wassersäule im Steigschacht bis zum Wiederbefüllen der Oberkammer. Dies hatte negative Auswirkungen:

- auf das erforderliche Gesamtvolumen der Oberkammer,
- auf einen zusätzlichen massiven Lufteintrag in die Unterkammer bei Zwischenspiegelständen und
- auf eine Behinderung des Freispiegelabflusses in der Unterkammer.

Ein wesentlicher Grund dafür war die "Schlankheit" der knapp 190 m langen Oberkammer mit einem durchgängigen Hufeisenprofil (B=6,2 m) und 0,5% Neigung. Die große Länge führte zusätzlich zu einer langen Wellenlaufzeit des Füllschwalles bis zur Reflexion am Ende der Kammer und wieder zurück. Weiters zeigte sich, dass bei maximalen Füllvorgängen der Oberkammer diese im hinteren Bereich verschließt, was in weiterer Folge beim Belüftungsbauwerk zu einem teilweisen Wasseraustritt führt. Durch die ursprüngliche Gestaltung wurde die Differentialwirkung der Kammer nicht optimal genutzt, d.h. dass das verbleibende Restvolumen in der Oberkammer die Aufnahmekapazität bei nachfolgenden Füllungsvorgängen massiv einschränkt und im Extremfall zu einer massiven Erhöhung des erforderlichen Kammerinhaltes führte.

#### 5.2 Modifikationen an der Oberkammer

Eine Voraussetzung bei der Gestaltung der Oberkammer war, dass bei maximaler Füllung der Kammer die Firste am Übergang zum Schrägschacht gerade eingestaut wird. Die Luftverbindung zum Belüftungsbauwerk sollte nicht unterbrochen werden.

Als Maßnahmenpaket wurden folgende Änderungen in der Konzeption der Kammer vorgeschlagen (Bild 3):

Die Erhöhung der Sohlneigung von 0,5% auf 1%: Interne Untersuchungen an kreisrunden
 Rohren bewiesen, dass durch eine Anhebung der Sohlneigung der Oberkammer von

- 0,5% auf 1% eine Verkürzung der Entleerungsdauer um bis zu 50% erzielbar ist. Die ursprüngliche Neigung der Kammerachse und der Firste von 0,5 % wurde beibehalten. Bei einer Erhöhung der Sohlneigung auf 1% musste das damit "verlorene" Volumen durch eine Vergrößerung des Querschnittes kompensiert werden.
- Eine Vertiefung der Sohle im vorderen Bereich auf einer Länge von ca. 100 m um 2,0 m zur früheren Schwallreflexion bei Zwischenspiegellagen. Durch diese Vergrößerung des Kammerquerschnitts bis auf eine maximale Innenhöhe von 8,0 m wurde auch das max. Entleerungsvermögen erhöht. Durch die Schwerpunktverlagerung des Füllvolumens in den "vorderen Bereich" der Kammer wurde die Entleerungsdauer zusätzlich verkürzt. Am Ende dieser eingetieften Strecke wurde eine Stufe mit 2,5 m Höhe zur Optimierung der Reflexionszeit vorgesehen.
- Der Einbau von zwei Staubalken im hinteren Bereich der Kammer zur Vermeidung des Wasseraustritts am Ende der Kammer. Die instationären Untersuchungen im Modell zeigten, dass aufgrund der Überlagerungen von gegenläufigen Schwallwellen ein plötzliches "Zuschlagen" in Mitte der Kammer (Slug flow) zu einer kurzzeitigen Überlastung führte und dadurch ein Wasseraustritt am Ende der Oberkammer auftrat. Dieser durch Lufteinschluss ausgelöste Zustand muss grundsätzlich unterbunden werden. Daher wurden zwei Staubalken im äußeren Bereich der Oberkammer als "Schwallbrecher" vorgesehen, womit durch eine Überlagerung von teilreflektierten Schwallwellen der Wasseraustritt unterbunden wurde.
- Einbau einer Kragplatte im Bereich des Belüftungsbauwerk: in einer Höhe von 1,20 m über der Firste der Kammer zum Schutz der Jalousien vor Stoßwellen mit teilweise Wasseraustritt bei der Reflexion am Kammerende notwendig.



Bild 3: Füllvorgang der modifizierten Oberkammer: Übergang Schrägschacht-Oberkammer, Reflexion Sohlschwelle, hinterer Bereich mit Staubalken, Reflexion am Ende der Kammer

Durch die beschriebenen Maßnahmen wurde die Dauer der jeweiligen Entleerungsvorgänge unter Ausnützung eines minimal erforderlichen Kammervolumens optimiert.

# 6 Zusammenfassung

Im Triebwasserweg des gerade im Bau befindlichen Pumpspeicherwerkes Limberg II der Verbund AHP AG, wird am Übergang zwischen dem Druckstollen und dem Druckschacht ein gedrosseltes Zweikammerwasserschloss errichtet. Physikalische Modellversuche

beschäftigten sich mit der hydraulisch-konstruktiven Gestaltung der Unterkammer, der im Schrägschacht angeordneten unsymmetrischen Drosselblende und der konstruktiven

Gestaltung der Oberkammer. In diesem Beitrag werden im Speziellen die instationären Füllund Entleervorgänge der Oberkammer behandelt. In Abhängigkeit der angesetzten Lastfälle

war es durch die große Länge der Oberkammer erforderlich, Schwallerscheinungen zu

minimieren. Dies wurde durch eine Adaptierung des Kammerquerschnittes sowie durch die

Anordnung einer Sohlstufe mit zusätzlichen Reflexionsbalken erreicht.

Mit den vorgeschlagenen Maßnahmen konnte eine für den freien Betrieb zufriedenstellende

Lösung erreicht werden, die eine wesentliche Verbesserung der instationären Füll- und

Entleervorgänge bewirkt.

# Autoren

Dipl.-Ing. Dr. Markus Larcher

VERBUND-Austrian Hydro Power AG

A - 1010 Wien; Am Hof 6a

Markus.Larcher@verbund.at

Dipl.-Ing. Dr. Helmut Knoblauch

Stremayrgasse 10

8010 Graz

helmut.knoblauch@tugraz.at

em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günther Heigerth

Stremayrgasse 10

8010 Graz

heigerth@tugraz.at

Dipl.-Ing. Erich Wagner

VERBUND-Austrian Hydro Power AG

A - 1010 Wien; Am Hof 6a

Erich.Wagner@verbund.at

Dipl.-Ing. Paul Stering

VERBUND-Austrian Hydro Power AG

A - 1010 Wien; Am Hof 6a

Paul.Stering@verbund.at

#### Literatur

- [1] Bollrich, G., Preißler, G.: Hydromechanik, Band 1, Verlag für Bauwesen
- [2] Naudascher, E: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Springer, 1987

### Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften

Bild 1: Systemskizze – Längeschnitt gedrosseltes Zweikammerwasserschloss mit durchflossener und integrierter Unterkammer

Bild 2: Übersichtsbild des Modellstandes – Vollmodell (M= 1:30)

Bild 3: Füllvorgang der modifizierten Oberkammer: Übergang Schrägschacht-Oberkammer, Reflexion Sohlschwelle, hinterer Bereich mit Staubalken, Reflexion am Ende der Kammer