Neue Schwellenform für das Stauwehr Laufenburg

Autor(en): **Peter, Marco / Cippà, Federico**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **101 (2009)**

Heft 3

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941940

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Neue Schwellenform für das Stauwehr Laufenburg

■ *Marco Peter, Federico Cippà*

Zusammenfassung

Zwischen 2004 und 2007 wurden am Stauwehr Laufenburg von Energiedienst die wichtigsten Sanierungsarbeiten seit der Erstellung vor fast 100 Jahren durchgeführt. Als langfristige Lösung zur Vermeidung künftiger Erosionsschäden in der Wehrsohle wurde die hydraulische Form der Wehrschwelle durch Einbringen von 450 m³ Beton neu gestaltet. Durch eine horizontale Sohle mit einer abrupten Abrisskante können nun die ehemals erheblichen Unterdrücke fast vollständig vermieden werden.

Für diese Sanierungsarbeiten mussten die Wehrfelder erstmals entleert werden. Um die Auftriebssicherheit der Sohlplatten im entleerten Zustand gewährleisten zu können, wurden total 114 Mikropfähle aus einem Floss durch das Wasser vorgängig versetzt.

Zur Beherrschung des höheren Unterwasserspiegels, der nach dem Bau des unterstrom liegenden Kraftwerkes Säckingen leicht angestiegen ist, und um ein höheres Sicherheitsniveau zu erhalten, wurden von der Firma Erne zwei neue Dammbalken als unterste Elemente des unterwasserseitigen Abschlusses geliefert. Ausführender Bauunternehmer war BBG Reimann, Basel dessen Wasserbauinventar mit Bootsführern, Tauchern usw. gegen Ende der Baustelle von Walo, Basel, übernommen wurden.

Die oberwasserseitigen Abschlüsse wurden jeweils von den Dammbalken und den Schützen gemeinsam gebildet, da weder die eine noch die andere Konstruktion auf den vollen Wasserdruck bei entleerten Wehrfeldern ausgelegt ist. Mit einer genau kontrollierten Stauabsenkung zwischen Oberwasserdammbalken und Schützen mussten die zulässigen Belastungen sichergestellt werden.

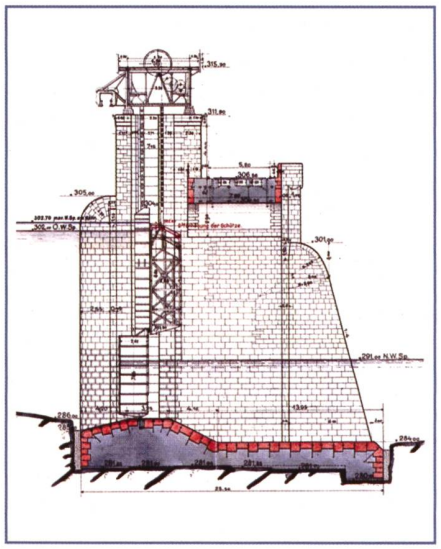

Bild 1. Eine der vier Wehröffnungen der Wehranlage Laufenburg.

1. Wehranlage Laufenburg

Die Wehranlage des Rheinkraftwerks Laufenburg von Energiedienst liegt rund 40 km östlich von Basel an der Grenze zwischen der Schweiz und Deutschland. Sie wurde vor dem Ersten Weltkrieg gebaut und im Jahr 1914 zusammen mit dem daneben liegenden Maschinenhaus in Betrieb gesetzt.

Die Tragkonstruktion besteht aus einer massiven, äusseren Verkleidung aus Granitblöcken, die mit Stampfbeton im Innern verfüllt wurde. Das Maschinenhaus wurde in den 90er-Jahren mit dem Ersatz der alten Turbinen durch 10 Straflo-Maschinen einem totalen Umbau unterworfen. Die Wehranlage erfuhr hingegen während fast eines Jahrhunderts nur kleinere, aber regelmässige Unterhaltsmassnahmen.

1.1 Überblick über die technischen Daten der Wehranlage

- Anzahl Wehröffnungen: vier sowie eine Schleuse
- Max. Stauhöhe: 10.4 m
- Max. Höhe der Schützen (2 und 3): 16.7 m
- Lichte Breite pro Wehröffnung: 17.3 m
- Mittlerer Jahresabfluss: 1010 m³/s
- Bemessungshochwasser: 5200 m³/s
- Abflusskapazität pro Wehröffnung: 1750 m³/s

1.2 Besonderheiten der Wehranlage Laufenburg

- Hoher spezifischer Abfluss (100 m³/s pro m Breite, resp. 9 MW/ m)
- Hohes Alter von über 90 Jahren
- Kein Tosbecken, aber fast 10 m Wassertiefe im Unterwasser
- Grosse globale Standsicherheiten, aber vereinzelt lokal zu hohe Spannungen.
- Die grossen Schützendimensionen von 16.7 m×17.3 m hätten bei üblicher Dammbalkenkonzeption zu einem sehr teuren oberwasserseitigen Dammbalkenabschluss geführt. Dies wurde mit der betrieblich heiklen, aber statisch günstigen Lösung des Zwischenstaus gelöst. Dadurch war es möglich, die OW-Dammbalken als auch die Wehrschützen nicht auf die volle Stauhöhe auszulegen.

Die Anlage ist auf zwei Arten von Zwischenstaus ausgelegt:

- Zwischenstau für Schützrevision: OW- und UW-Dammbalken werden gesetzt. Zwischen OW- und UW-Dammbalken wird ein Zwischenstau hergestellt, der ungefähr in der Mitte zwischen OW- und UW-Wasserspiegel liegt, so dass sowohl die OW- als auch die UW-Dammbalken durch einen rheinabwärts gerichteten Wasserdruck belastet werden (Aufteilung der Belastung). Die Wehrschütze wird anschliessend über die Zwischenstaukote ins Trockene gezogen.
- Zwischenstau für Wehrfeldentleerung: Die OW- und UW-Dammbalken sowie die Wehrschütze werden gesetzt. Zwischen den OW-Dammbalken und der Wehrschütze wird ein Zwischenstau hergestellt. Das Wehrfeld zwischen Schütze und UW-Dammbalken wird leergepumpt. Die OW-Damm-

Bild 2. Schäden durch Unterdruck beim Schwellenknick. Fliessrichtung von links nach rechts, Aufnahme zu Beginn der Trockenarbeiten beim Wehrfeld 1.

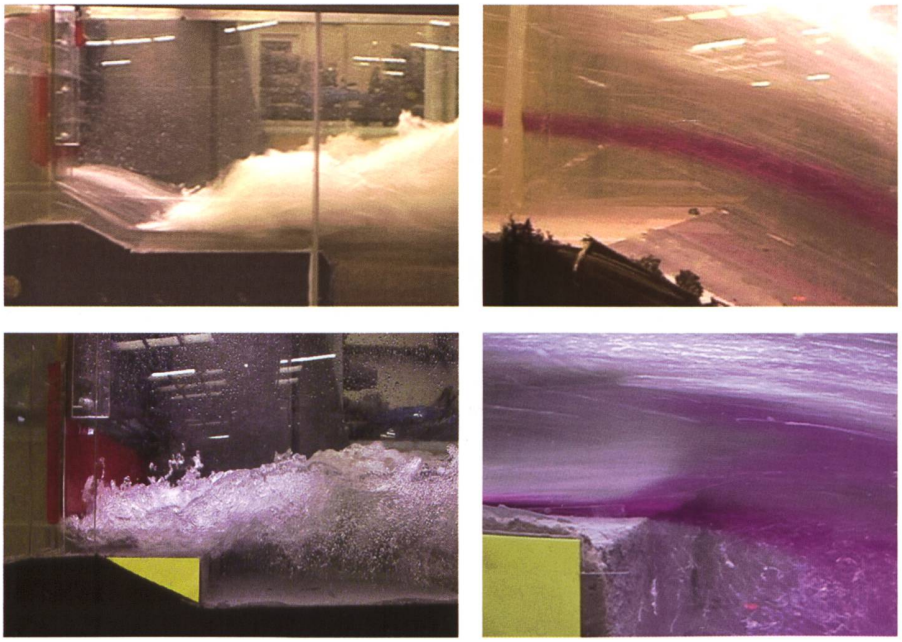

Bild 3. Hydraulische Modellversuche mit der alten Sohle (oben) und mit der neuen Betonsohle (unten); der Knick in der Sohle wurde durch eine senkrechte Wand ersetzt, so dass der Strahl abreissen kann. Die fast gleichmässige Strömung der alten Form sieht auf den ersten Blick im Modell «schön» aus, führt aber zu teilweise erheblichem Unterdruck.

balken und die Wehrschütze sind durch einen rheinabwärts gerichteten Wasserdruck, die UW-Dammbalken durch einen rheinaufwärts gerichteten Wasserdruck belastet. Die genaue Kontrolle von diesem Zwischenstau erfordert die Installation von mehreren Pumpen, die sowohl in den Zwischenraum DB- Schütz als auch aus diesem Zwischenraum rauspumpen und mit einer Notstromversorgung abgesichert sind.

Der zweite Zwischenstau – und somit auch die totale Wehrfeldentleerung – war seit der Inbetriebsetzung, d.h. seit rund 90 Jahren, nicht durchgeführt worden.

2. Schäden der Anlagen und Ursachen der Sanierungsmassnahme

Aus regelmässigen Unterwasserinspektionen waren dem Kraftwerksbetrieb Schäden in der Wehrsohle beim Schwellenknick schon länger bekannt. Die massiven Stahlplatten, die im betroffenen Sohlenbereich als Abrasionsschutz über die Granitsteine verlegt und kräftig verankert wurden, fehlten teilweise *Bild 2*.

Die Schäden waren auf Unterdruckverhältnisse im Sohlenbereich bei Wehrbetrieb und somit auf eine hydraulisch nicht optimale Form der alten Sohle zurückzuführen.

Durch Taucher wurden während der letzten Jahrzehnte immer wieder Reparaturarbeiten ausgeführt, ohne aber unter Wasser eine nachhaltige Lösung realisieren zu können. Die Häufigkeit der Reparaturen hatte in den letzten Jahren deutlich zugenommen.

Falls sich die Schäden durch den Granit bis zum vergleichsweise viel weicheren Stampfbeton ausgeweitet hätten, so hätte sich sehr schnell eine weitgehende Erosion entwickeln können. Es war somit erforderlich, eine möglichst dauerhafte Lösung zu finden.

3. Hydraulische Untersuchungen

Zur Aufhebung der Unterdrücke wurde eine geometrische Anpassung der Sohle untersucht: Der horizontale Sohlenbereich unterstrom von der Wehrschütze sollte verlängert und dessen UW-Abschluss als vertikale Abrisskante ausgebildet werden.

Die hydraulischen Versuche zur Erfassung der Druckverhältnisse und Strömungszustände an der alten Sohle sowie an neuen Sohlvarianten wurden an der TU Karlsruhe durchgeführt. Die erhoffte Wirkung des neuen Betonkeils konnte durch das hydraulische Modell bestätigt werden (siehe *Bilder 4* und *5*).

4. Statische Untersuchung der entleerten Wehrfelder

Für den Umbau der Wehrsohle wurde aus Qualitätsgründen lediglich eine Ausführung im Trockenen ernsthaft in Betracht gezogen. Dazu waren statische Untersuchungen der entleerten Wehrfelder erforderlich. Im Wesentlichen galt es folgende Fälle nachzuweisen:

4.1 Wehrsohle unter Auftrieb

Zur Abtragung der Auftriebskräfte wurden statische Modelle mit Druckbögen entwickelt. Kombinierte Lastabtragungen senkrecht zur Fliessrichtung des Rheins gegen die Wehrpfeiler und parallel zur Fliessrichtung gegen die Wehrschütze und die UW-Dammbalken wurden untersucht. Ausreichende Sicherheiten konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Entscheidend erwiesen sich dabei die Unsi-

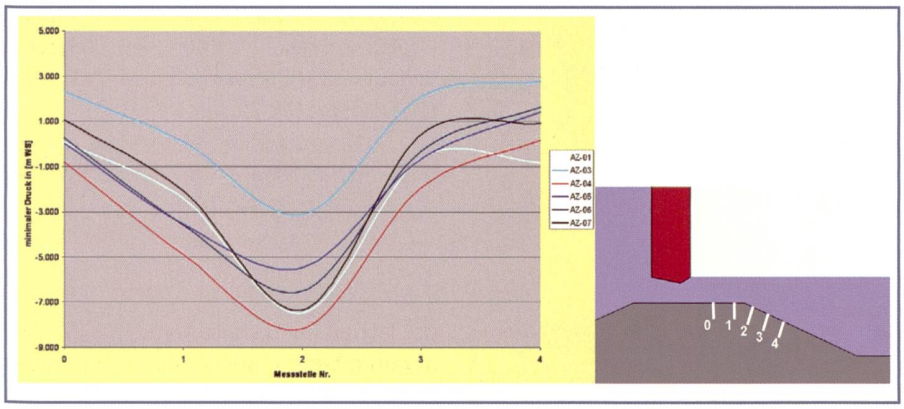

Bild 4. Druckmessungen im hydraulischen Modell bei der alten Sohle für verschiedene Lastfälle; Unterdruck bis fast neun Meter Wassersäule, da sich der Strahl nicht ablöst.

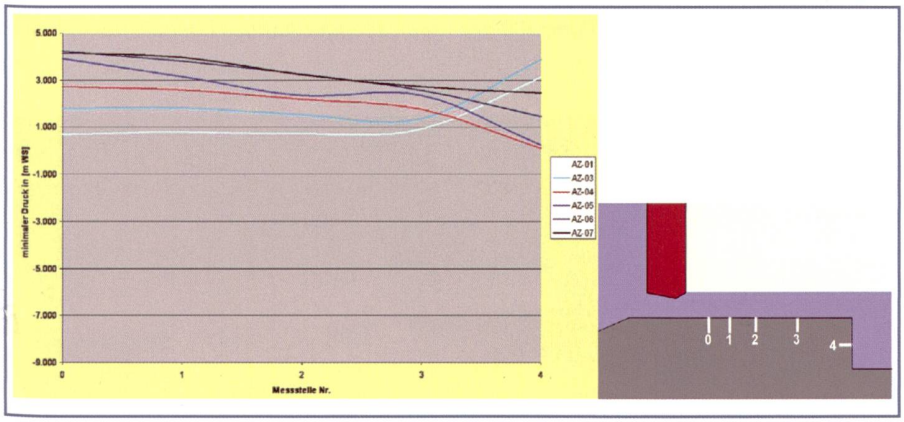

Bild 5. Druckmessungen im hydraulischen Modell für die neue Sohle für verschiedene Lastfälle; kein Unterdruck.

cherheiten bei der alten Sohle: Sowohl die Stärke des Stampfbetons als auch dessen Eigenschaften waren mit ungenügender Sicherheit bekannt.

Als Massnahme zur Erhöhung der Sicherheit der Sohle gegen zu hohe Auftriebskäfte wurde der Einsatz von Mikropfählen gewählt. Darauf wird in Abschnitt 4.4 und 5.1 näher eingegangen.

4.2 Seitliches Kippen der Wehrpfeiler

Die Pfeiler eines entleerten Wehrfeldes werden durch einseitigen Wasserdruck belastet. Die seitliche Kippstabilität konnte nachgewiesen werden.

Die Annahmen für den Druckabbau vom OW- zum UW-Stand unter den Pfeilern und unter der Sohle waren für diese Nachweise entscheidend. Um diese Bemessungsgrundlage zu kontrollieren, wurden in jedem Wehrpfeiler Piezometer installiert.

4.3 Stahlwasserbau

Die Tragsicherheit der Dammbalken und der Wehrschütze wurde nachgeprüft.

Die alten Dammbalkenelemente wurden – im Sinne einer statischen Optimierung, die viele alte Bauwerke charakterisiert – einzeln bemessen und müssen in der vorgegebenen Reihenfolge gesetzt werden. Zur Erhöhung der Hochwassersicherheit und Tragsicherheit wurden zwei neue UW-Dammbalkenelemente als unterste Elemente angefertigt. Im Laufe der Zeit wurde die Anlage durch ein später gebautes, unterstrom liegendes Kraftwerk eingestaut.

Um den OW-Dammbalken auslegungsgerecht nur mit rund 35% der Stauhöhe belasten zu können und auch den Schütz nicht über die Wasserspiegeldifferenz zwischen OW und UW zu belasten, musste ein Zwischenstau zwischen OW-Dammbalken und Wehrschütz eingehalten werden, der 4 m bis 5.6 m unter dem Stauziel lag. Durch die variablen Undichtigkeiten bei jedem dieser beiden Abschlussorgane war die Einhaltung des Zwischenstaus eine anspruchsvolle Aufgabe an den Kraftwerksbetrieb, der deshalb mehrere redundante Pumpensysteme und Flutöffnungen installierte.

4.4 Mikropfähle

Zur Erhöhung der Auftriebssicherheit der Sohle im entleerten Zustand wurden ca. 30 schlaffe Zugmikropfähle von 50 mm Stahldurchmesser pro Wehrfeld versetzt.

Bild 6. Bohrarbeiten für die Mikropfähle ab Floss im Wehrfeld 4 (beim Schütz ist die austretende Druckluft des Bohrgerätes sichtbar).

Bild 7. Schalung und Bewehrung für die neue Betonsohle.

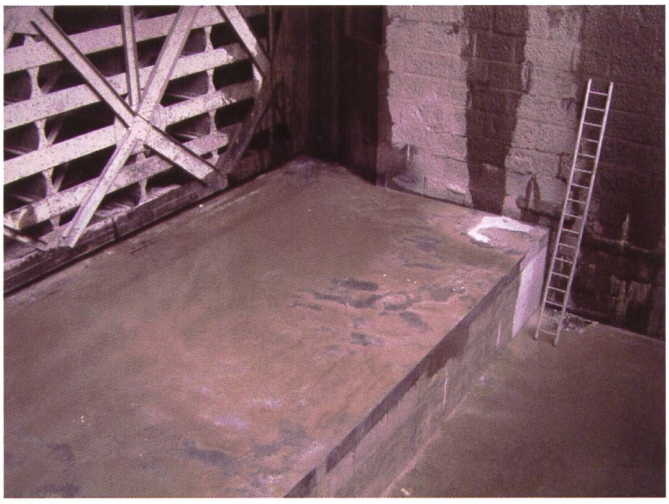

Bild 8. Ausschnitt von einer umgebauten Schwelle.

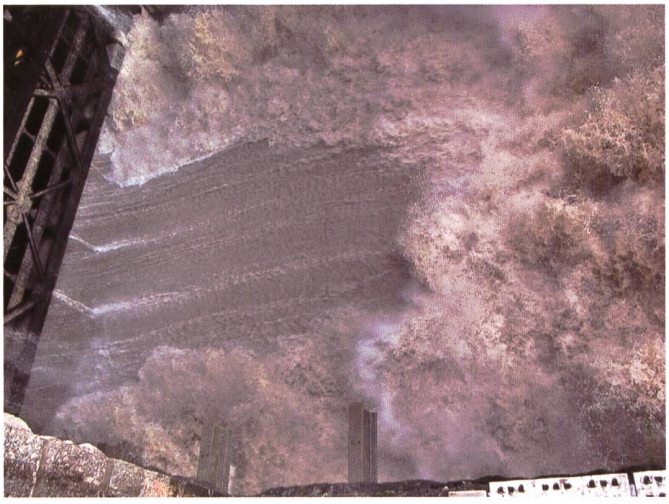

Bild 9. Rund 100 m³/s schiessender Abfluss über die neue erste Sohle.

Dabei konnte auf die bei der Sanierung der Wehranlage Augst-Wyhlen (rund 30 km unterstrom von Laufenburg) gesammelten Erfahrungen zurückgegriffen werden, bei welcher ebenfalls Mikropfähle als dauerhafte statische Verstärkungsmassnahme zum Einsatz kamen. Die wesentlichen Vorteile der Mikropfähle sind:

- Viele kleine Kräfte verteilt auf eine grosse Oberfläche führen zu tiefen Spannungen im Beton;
- Gutes Langzeitverhalten im Vergleich mit anderen Zugelementen dank doppeltem Korrosionsschutz, unempfindlichem Stahl und grossem Stahldurchmesser;
- Gute Anpassung an das schwer vorhersagbare Tragverhalten der dicken und alten Baustruktur des Stauwehrs dank duktilen Materialverhalten;
- Einfache Ausführung, die einen Einbau unter Wasser noch ermöglicht.

Bild 10. Die Wehranlage mit rund 2200 m³/s durch zwei Wehrfelder. Im Vordergrund Wehrfeld 3 ohne Abfluss, aufbäumende Wassermassen beim alten Wehrfeld 2 und die lange Dissipationszone nach dem umgebauten Wehrfeld 1 (vor der Betonleitwand zum Kraftwerksauslauf).

5. Ausführung

5.1 Mikropfahlarbeiten

Die Mikropfahlarbeiten wurden von einem Floss aus durchgeführt. Auf dem Floss fanden ein grosses Bohrgerät (mit kleinem Kranarm), die gelagerten Mikropfähle, die Taucherausrüstungen und allgemeine Baustelleninstallation Platz. Der Kompressorwagen verblieb als einzige Installation an Land. Sowohl für die Bohrarbeiten als auch für das Versetzen und Injizieren der Mikropfähle war die Unterstützung durch Taucher unumgänglich. Diese Arbeiten mussten weitgehend im Winter mit wenig Wehrabfluss ausgeführt werden, da Wehrabfluss in benachbarten Wehrfeldern das Floss und insbesondere das Beiboot in zu arge Bedrängnis brachten. Die Schleuse konnte als sicherer Schutzhafen benutzt

Bild 11. Die obere Hälfte der Wehranlage, die aus dem Unterwasser ragt, wurde durch den Umbau nicht verändert.

werden. Als Erstes wurden Schlagbohrungen von 133 mm Durchmesser durchgeführt. Anschliessend erfolgte der Einbau der Mikropfähle mit Hüllrohr und erstem Korrosionsschutz aus Mörtel, Distanzhaltern und Nachverpressschläuchen. Die Injektion der Mikropfähle und die teilweise durchgeführten Nachverpressungen erfolgten durch die unter Wasser montierten Pfahlköpfe aus Stahl.

Erst nach vollständiger Installation und Verpressen aller Mikropfähle eines Wehrfeldes wurde der UW-Dammbalken gesetzt und das Wehrfeld entleert.

5.2 Betonarbeiten in den entleerten Wehrfeldern

Es wurden zwei Betonsorten eingesetzt:

- In den massigen Zonen ein Beton geringer Wärmeentwicklung mit Modero 3A-Zement (B 40/30).
- An den Oberflächen ein mit Silicafume vergüteten Beton mit Fortico 5R-Zement (B 60/50).

5.3 Baustellenlogistik

Der Personenzugang in die entleerten Wehrgruben war nur über Leiter und Treppenhausturm von der Wehrbrücke möglich. Um die Sicherheit gegen eventuelle Störungen im Kraftwerksbetrieb gewährleisten zu können, wurde ein Alarmsystem installiert.

Da die Wehrbrücke auf jeder Seite direkt an Treppen anschliesst, kann sie nicht befahren werden. Die Materialanlieferungen für die Mikropfahlarbeiten wurden über den Wasserweg vollzogen, und der Beton musste vom Widerlager des Wehres für alle vier Wehrfelder gepumpt werden.

6. Erste Erfahrungen mit der neuen Schwelle

Nachdem nun bereits mehrere Hochwasser über diese neuen Schwellen geströmt sind, können die Erwartungen bestätigt werden. Die neuen Betonstrukturen sind vollständig intakt. Oft sind sie noch in einem Zustand, als wären sie eben fertig gestellt worden, und teilweise haben sie oberflächliche Gebrauchsspuren; meist im mm-Bereich. Die Abrisskanten waren durchgehend in einem einwandfreien Zustand.

Die Sohle unterhalb der Abrisskante ist aufgrund des Geschiebetriebes bei Hochwasser rau (wie gestockt). Es wird erwartet, dass die Stirnseite bei der Abrisskante langfristig auch zerschlagen wird. Dafür wurde bereits vorsorglich eine zusätzliche Lage Bewehrung eingelegt.

Die höhere Lage des Wasserstrahles führt beim danebenliegenden Kraftwerksauslauf zu einer Injektorwirkung mit merklichem Einfluss. Durch die leicht tieferen Wasserstände kann bei Hochwasser geringfügig mehr produziert werden.

Nach der Behebung dieser Schwachstelle ist diese bald 100-jährige Anlage bestens für die Zukunft gerüstet. Ihre Bauweise mit grossen Granitblöcken, die alle in den innern Füllbeton verankert sind, macht diese Anlage äusserst langlebig.

Anschrift der Verfasser
Marco Peter, Federico Cippà
Pöyry Energie AG
Hardturmstrasse 161, CH-8037 Zürich
Tel. +41 44 355 55 54
marco.peter@poyry.com
federico.cippa@poyry.com

Rechenreiniger und Rechensysteme

www.muhr.com

MUHR

Rock Island, USA

Muhr HYDRONIC M-5000: 41 m Auslegerlänge, 9 to Hubkraft, 34 m Reinigungstiefe, 180 m Verfahrweg. Leistungssteigerung des Kraftwerks durch die Muhr HYDRONIC M-5000: Bis zu 8 MW pro Stunde.

Flexizient.

Mehr Flexibilität. Mehr Effizienz.

Muhr Rechenreiniger und Rechensysteme HYDRONIC CATRONIC

Profitieren auch Sie mit Muhr vom weltweit umfangreichsten Programm an Rechensystemen: Für mehr Flexibilität und perfektes Realisieren Ihrer individuellen Anforderungen vor Ort. Für mehr Effizienz: Kostensenkend durch 100% vollautomatischen wärterlosen Betrieb. Zuverlässig, langlebig und nahezu wartungsfrei. Mit weltweit über 800 installierten Anlagen steht Muhr als einer der weltweit führenden Hersteller von Rechensystemen nicht nur für höchste Sicherheit und Kompetenz sondern zusätzlich für mehr Flexibilität und mehr Effizienz von Anfang an.

Rechenreiniger - Stahlwasserbau

Mehr Infos. Jetzt anrufen.
+49 (0)8034 9072-0

Muhr GmbH
Grafenstraße 27
D-83098 Brannenburg

info@muhr.com
www.muhr.com

4E Erfahren. Einfallsreich. Effizient. Exakt. Das Muhr 4E Konzept.