BEHERRSCHUNG DER VERLANDUNG IN EINEM MEHRZWECKSTAUSEE EINES LAUFKRAFTWERKES AN EINEM STARK SEDIMENTFÜHRENDEN FLUSS

Anton Schleiss¹, Erik Bollaert², Philip Irniger³

¹ Prof. Dr. Dipl. -Bauing., ² Dipl. -Bauing., Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne, Schweiz ³ Dipl. -Bauing., Deuring + Oehninger AG, Winterthur, Schweiz

KURZFASSUNG

Durch eine innovative Gestaltung und Anordnung des Mehrzweckspeichers eines Laufkraftwerkes können selbst im Falle eines stark sedimentführenden Flusses die Verlandungsprobleme erfolgreich bewältigt werden. Die vorgestellte Machbarkeitsstudie erlaubte für die Mehrzweckanlage eine interessante Synergie zwischen Hochwasserschutz, Wasserkraftnutzung, Volkswirtschaft und Ökologie zu entwickeln. Mit einer numerische 2D Simulation von Abfluss und Sedimenttransport konnte die Anordnung des Projektes sowie dessen Betriebsweise schrittweise optimiert und so der Beweis der Machbarkeit und Nachhaltigkeit der Mehrzweckanlage erbracht werden.

1. EINFÜHRUNG

Laufwasserkraftwerke an stark sedimentführenden Flüssen werden normalerweise ohne grosse Speicher geplant, da diese neben der Problematik der Kontinuität des Geschiebetransportes vor allem einer starken Verlandung durch die Schwebstoffabsetzung ausgesetzt sind. Neue Laufwasserkraftwerke in Europa sind in der heutigen Situation des liberalisierten Elektrizitätsmarktes aber nur wirtschaftlich konkurrenzfähig, wenn sie als Mehrzweckprojekte realisiert werden. Im Vordergrund stehen neben der Stromerzeugung der Hochwasserschutz, die ökologische Abflussregulierung, die Schaffung von neuen Naturreservaten sowie zusätzlichen Wasserflächen für Freizeitaktivitäten. Solche Mehrzweckstauanlagen erfordern aber entsprechend grosse Speichervolumen bzw. -oberflächen, die jedoch bezüglich der Verlandung problematisch sind. Für den Entwurf der Morphologie solcher Mehrzweckspeicher müssen deshalb neue Wege beschritten werden.

Im Rahmen der 3. Rhonekorrektion im Kanton Wallis in der Schweiz, wurde die Machbarkeit einer wasserbaulichen Mehrzweckanlage im Hinblick auf diese Verlandungsproblematik und weiterer ökologischer Aspekte untersucht. Es ging darum, ein Mehrzweckprojekt zu definieren, welches die Synergien zwischen Hochwasserschutz, Wasserkraft und Renaturierung der Rhone am besten nutzt. Um die Verlandung des Speichers beherrschen zu können, wurde eine innovative Anordnung von Staubecken und Wasserkraftanlage entwickelt, welche mit numerischen Simulationen bezüglich Anströmung und Sedimenttransport optimiert wurde [1].

2. KONZEPTION DES SPEICHERS UND LANDSCHAFTSEINGLIEDERUNG

Ein Hauptmerkmal der entwickelten Lösung ist, dass der zugehörige Stausees parallel zum bestehenden Flussbett angeordnet ist und gegen dieses mit einem abschnittsweisen durchlässigen, überströmbaren Damm abgetrennt ist (Abb. 1). Dadurch wird der Speicher im Normalbetrieb der Anlage nicht durchströmt, und der Geschiebtransport findet ausschliesslich im bestehende Flussbett statt. Eine offene Verbindung zwischen dem Flussbett und der Stauanlage erfolgt erst in unmittelbar Nähe des Wehres und des Krafthauses. Diese Verbindung muss so ausgestaltet sein, dass die Turbinen möglichst optimal angeströmt werden, und gleichzeitig kein Geschiebe sowie keine Feinsedimente in den Stauraum gelangen können. Alpine Flüsse im generellen und die Rhone im speziellen sind stark mit Feinsedimenten belastet (bis 5 g/l), welche vorwiegend aus den vergletscherten Gebieten stammen. Das stark befrachtete Wasser wird wegen seiner weiss-grauen Trübung deshalb etwa auch als Gletschermilch bezeichnet. Dieser Verlandungsproblematik wurde mit einer innovativen Formgebung des Stausees mit mehreren Leitinseln sowie einer om des Kraftwerkes begen und des Kraftwerkes begen und des Kraftwerkes begen und des kannet.



Abb. 1: Generelle Anordnung des Stausees und Elemente des Mehrzweckprojektes

Der Stausee mit einem Volumen von 7.6 Mio m³ und einer mittleren Tiefe von 7.6 m wird durch eine Wehranlage mit 5 unter- und überströmbaren Schützen von 13 m Breite gebildet. Das mit 4 Rohrturbinen ausgerüstete Laufkraftwerk ist seitlich zum Wehr angeordnet. Die Fischwanderung wird durch ein Umgehungsgerinne ermög-

licht, welches zwischen der Wehranlage und dem Kraftwerk angeordnet ist und mit einer Abflussmenge bis zu 5 m³/s beaufschlagt wird. Ein durchlässiger Damm-abschnitt an der Stauwurzel garantiert, dass eine schwach befrachtete Abflussmenge von mindestens 5 m³/s vom Flussbett in den Stauraum gelangt. Diese minimale Durchflussmenge erzeugt minimale Fliessgeschwindigkeiten im Stausee, so dass die Feinsedimente nicht ungehindert vom Unterwasser in diesen gelangen und sich grossräumig absetzen können.



Abb. 2: Landschaftsgestaltung im optimierten Stauraum

Die vorgeschlagene landschaftliche Gestaltung des Stauraumes ist in Abb. 2 dargestellt. Drei Nutz- bzw. Schutzzonen können unterschieden werden:

- Verbindungszone zwischen Hauptfluss, Wasserkraftanlage und Staubecken (mit 2D numerischer Simulation optimiert)
- Naturschutzzone mit Auenlandschaften
- Erholungs- und Freizeitzone

Die gefundene, optimale geometrische Lösung des Mehrzweckspeichers, insbesondere die Leitinseln in der Nähe der Wasserkraftanlage können die Sedimenteinträge in den Stauraum erfolgreich beschränken.

3. MEHRZWECKNUTZUNG DES STAUSEES

3.1 Hochwasserschutz

Dank einer Vorabsenkung von 2 m gegenüber dem normalen Betriebsspiegel kann der Stausee bei Hochwasserereignissen ein Rückhaltvolumen von 2 Mio m³ zur Verfügung stellen. Dadurch können Abflussengpässe im Unterlauf der Rhone entschärft werden. Gleichzeitig kann bei Extremereignissen über einen überflutbaren

Dammabschnitt eine Überflutungszone aktiviert werden, welche den Rückhalt von weiteren 5 Mio. m³ erlaubt. Dadurch kann die Spitze des 100-jährigen Hochwassers von 1260 m³/s um rund 200 m³/s reduziert werden.

3.2 Schwallverminderung

Neben dem eigentlichen Hochwasserschutz kann der Speicher die täglichen, unnatürlichen Abflussschwankungen in der Rhone dämpfen, welche durch die Wasserrückgaben der Speicherkraftwerke flussaufwärts verursacht werden (Abb. 3). Dies erlaubt eine erhebliche ökologische Aufwertung der Rhone flussabwärts insbesondere im Winterhalbjahr, wo sich die Schwallerscheinungen besonders stark bemerkbar machen. Dabei wird der Stauraum in der Nacht und in den frühen Morgenstunden leicht abgesenkt (0.3 bis 0.4 m) um den geringen Rhoneabfluss anzureichern. In den Spitzenzeiten des Turbinierbetriebs der Speicherkraftwerke wird dann die Schwallwelle durch einen Aufstau des Stausees um 0.7 m gebrochen. Dadurch lassen sich die täglichen Spiegelschwankungen an einem Wochentag im Winter von heute 1 m auf zukünftig 0.3 m reduzieren.



Abb. 3: Einfluss des Mehrzweckspeichers auf die Abflussschwankungen während einer Woche im Winterhalbjahr.

3.3 Wasserkraftnutzung

Die in der Machbarkeitsstudie untersuchte Wasserkraftanlage besteht aus dem eigentlichen Maschinenhaus und einem regulierbarem Wehr, welches mittels 5 Segementschützen (HxB = 6x13 m) mit aufgesetzter Klappe (H = 2 m) ein Abfluss von 1260 m³/s (1000-jährliches Hochwasser) entlasten kann. Krafthaus und Wehranlage sind durch eine Leitinsel getrennt, welche auch das Rauhgerinne für den Fischaufstieg beherbergt. Das mit 5 Rohrturbinen ausgerüstete Maschinenhaus ermöglicht eine mittlere Jahresproduktion von 43 GWh bei einer Nettofallhöhe von 5.0 m und einer Ausbauwassermenge 200 m³/s, welche an 65 Tagen im Jahr überschritten wird. Die relativ geringe Nettofallhöhe von 5 m wurde in der Studie bewusst gewählt, um nicht die technische und umweltpolitische Machbarkeit des Projektes

durch eine zu starke Beeinflussung des Grundwasserspiegels in der Rhoneebene zu gefährden.

3.4 Erholungs- und Naturschutzzone

Mit Inseln und Flachwasserzonen können die Voraussetzungen geschaffen werden, dass sich der Stauraum im Laufe der Zeit zu einem Naturreservat entwickelt (Abb. 2). Insbesondere periodisch überflutete Zonen entlang der Ufer sind ökologisch wertvoll, da Auengebiete selten geworden sind. Gleichzeitig kann ein abgegrenzter Teil der Staufläche für Freizeitaktivitäten (Schwimmen, Fischen, Surfen usw.) und als Erholungsraum zugänglich gemacht werden.

4. OPTIMIERUNG DER ANORDNUNG MIT EINEM NUMERISCHEN SIMULATIONSMODELL

4.1 Numerisches Modell

Die im Kapitel 2 beschriebene Anordnung wurde mit einem 2D numerischen Simulationsmodell bezüglich Hydrodynamik und Verlandung optimiert. Die Modellierung konnte auf einen massgebenden Bereich von Hauptfluss und Staubecken beschränkt werden, welcher sich bis etwa 600 m flussaufwärts der Wasserkraftanlage erstreckt (Abb. 1 und 4). Der Zweck der numerischen Modellierung war, war eine optimale Anordnung zu finden, welche durch eine verlustarme Anströmung des Kraftwerkes und einen möglichst geringen Sedimenteintrag in den Stauraum, sowie vorteilhaftes Verhalten bei Spülungen gekennzeichnet ist.

Die Berechnungen wurden mit dem Finite Element Programm SMS (Surface Water Modeling System) [2] durchgeführt, welches sich in ähnlichen Problemstellungen bewährt hatte [3]. Erosionen und Ablagerungen wurden dabei mit der Transportformel von Ackers-White [4] ermittelt.

4.2 Optimierung der Anströmungverhältnisse

In einer ersten Phase wurde eine hydraulisch optimale Anordnung mit guten Anströmbedingungen zum Maschinenhaus gesucht. Im weiteren sollte im Normalbetrieb möglichst wenig Wasser vom Oberwasserkanal des Maschinenhauses über die Verbindungszone in den Stauraum gelangen (Abb. 4). Um diese Bedingungen zu befriedigen, wurden mehrere Varianten für die zwei folgenden Abflussbedingungen untersucht:

- Normalbetrieb des Maschinenhaus mit der Ausbauwassermenge von 200 m³/s (an 65 Tagen im Jahr überschritten) ohne Wehrabfluss
- Hochwasserabfluss mit 1000 m³/s (Wiederkehrperiode von etwa 60 70 Jahren) ohne Betrieb des Maschinenhauses

Die gefundene, hydraulisch optimale Lösung ist durch eine ausgezeichnete Anströmung des Maschinenhauses im Normalbetrieb gekennzeichnet (Abb. 4, Variante B). Um zusätzlich das Risiko des Sedimenteintrages in den Stauraum zu verringern, wurde die Geometrie des Oberwasserkanals sowie die Verbindungszone zum Stauraum weiter modifiziert (Abb. 4, Schlusslösung).



Abb. 4: Gewählte Anordnung mit Modifikationen gegenüber der rein hydraulisch optimalen Lösung

Mit diesen Modifikationen konnte die gleichmässige Abflussverteilung im Zulaufkanal zum Maschinenhaus beibehalten werden, wobei die lokal maximalen Geschwindigkeiten auf auf 0.6 m/s begrenzt werden konnten (Abb. 5). Beim Normalbetrieb des Maschinenhauses (200 m³/s) gelangen nur 3 m³/s vom Oberwasserkanal über die Verbindungszone in den Stauraum (Abb. 5 a). Dieser Abfluss in Richtung Stauraum steigt bei Hochwasser (1000 m³/s) auf 40 m³/s an (Abb. 5 b).



Abb. 5: Strömung und Geschwindigkeitsverteilung für die gewählte Anordnung: a) Normalbetrieb des Maschinenhaus mit 200 m³/s (links), b) Hochwasserabfluss mit 1000 m³/s über Wehr (rechts).

4.3 Optimierung hinsichtlich Sedimenteintrag in den Stauraum

4.3.1 Transportmodell

Grundsätzlich können die Sedimente in Bodennähe als Geschiebe oder als Suspension transportiert werden. Sobald sich in Suspension befindende Körner abgesetzt haben, können sie also in Bodennähe als Geschiebe weiter befördert werden. Um diese Prozesse unterscheiden zu können, wurden die Grenzen zwischen Erosion und Transport als Geschiebe sowie zwischen Suspension und Absetzung gemäss der Theorie nach Hjulström [5] analysiert. Transportberechnungen zeigten zudem, dass im Normalbetrieb nur Körner mit Durchmesser kleiner als 2 mm in den Bereich der Wasserkraftanlage gelangen können. Gröbere Fraktionen werden bereits im Hauptgerinne beginnend von der Stauwurzel deltaähnlich abgesetzt und erreichen nicht den numerisch modellierten Bereich.

4.3.2 Verlandungsverhalten der optimierten Anordnung

Das Verhalten der optimierten Anordnung bezüglich Verlandung wurde vorerst mit einer Simulation über 24 Stunden im Normalbetrieb untersucht. Die ermittelten Verlandungsstärken haben also nur qualitativen Charakter. Zwei bedeutende Verlandungszonen konnten mit der Simulation identifiziert werden (Abb. 6). Die erste befindet sich im Hauptgerinne stromaufwärts des Wehres. Die zweite erstreckt sich in den Oberwasserkanal und die Verbindungszone zum Stauraum (Abb. 6 a). Diese Ablagerungen können während grösseren Hochwasserabflüssen leicht wieder aufgewirbelt und als Suspension weiter flussabwärts transportiert werden. Die detailliertere Analyse gemäss der Theorie von Hjulström zeigt aber, dass alle Ablagerungen in der Transportzone liegen und somit in Sohlennähe als Geschiebe weiterverfrachtet werden können (Abb. 6 b). In der Verbindungszone zwischen Oberwasserkanal und Stauraum entsteht eine Rückströmung, deren Geschwindigkeit ausreicht, um im Oberwasserkanal abgelagerte Sedimente in Bodennähe in den Stauraum zu verlagern.



Abb. 6: a) Berechnete Verlandungszonen (d_m = 0.02 mm, Simulationsdauer 24 h, Suspensionsfracht 1 g/l). b) Erosions-, Transport- und Ablagerungszonen gemäss Hjulström. Durchströmung des Staubeckens mit 5 m^3 /s.

Wie in Abschnitt 2 erwähnt wird das Staubecken kontinuierlich von einem minimalen Abfluss von 5 m³/s durchflossen. Dieser unterdrückt eine grossräumige Rotationsströmung oberwasserseitig der Verbindungszone des Oberwasserkanals mit dem Staubecken. Dadurch wird eine Absetzung der als Suspension über die Verbindungszone in den Stauraum gelangten Feinsedimente verhindert. Hingegen beeinflusst dieser Durchströmabfluss von 5 m³/s die Ablagerungs- und Transportzonen in der eigentlichen Verbindungszone nur unmerklich.

4.3.3 Einfluss des Kraftwerkbetriebs auf die Verlandung

Bis zur Ausbauwassermenge von 200 m³/s bleibt die Wehranlage geschlossen. Bei grösseren Abflüssen wird das Wehr kontinuierlich geöffnet, um den Oberwasserspiegel konstant zu halten. Bezüglich Sedimenteintrag in das Staubeckens stellt sich die Frage, ob bei grösseren Hochwasserabflüssen der Kraftwerkbetrieb nicht besser eingestellt und der ganze Abfluss über die Wehranlage geleitet werden soll. Diese Frage wurde für ein 10-jährliches Hochwasser von 600 m³/s untersucht (Abb. 7). Dabei wurde der Fall mit Kraftwerkbetrieb (Abb. 7 a: 200 m³/s über Krafthaus, 400 m³/s über Wehranlage) mit demjenigen ohne Kraftwerkbetrieb (Abb. 7 b: 600 m³/s über Wehranlage) verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Einstellung des Kraftwerkbetriebs bei grössen Hochwasserabflüssen vorteilhaft ist, indem die Absetzung von sehr feinen Sedimenten (d_m = 0.02 mm) im Oberwasserkanal stark reduziert wird und die gröberen Körner (d_m = 0.08 mm) als Suspension direkt durch die Wehranlage transportiert werden.



Abb. 7: Einfluss des Kraftwerkbetriebs auf die Verlandungszonen ($d_m = 0.02$ mm, Simulationsdauer 24 h, Suspensionsfracht 1 g/l). Durchströmung des Staubeckens mit 5 m³/s. a) 200 m³/s über Krafthaus, 400 m³/s über Wehranlage b) Gesamter Abfluss von 600 m³/s über Wehranlage.

4.3.4 Wirksamkeit der Spülungen

Nach Abklingen eines Hochwassers können durch Öffnen der Wehrschützen die im Oberwasserkanal und im Staubecken abgesetzte Sedimente gespült werden. Voraussetzung ist allerdings, dass mit der Spülung die kritischen Erosionsgeschwindigkeiten gemäss Hjulström in Sohlennähe erreicht werden. Diese kritische Geschwindigkeiten ergeben sich, falls der Stauraum durch eine "Spülwassermenge" von mindestens 200 m³/s durchströmt wird. Um diesen Durchfluss zu erzeugen, muss der Spiegel im Stausee kurzzeitig um 2 m abgesenkt werden.

Die Wirksamkeit dieses Spülvorganges ist in Abb. 8 für verschiedene Korngrössen verdeutlicht ($d_m = 0.02 \text{ mm}$, 0.2 mm und 2.00 mm). Es kann festgestellt werden, dass die Spülung im Hauptgerinne, im Oberwasserkanal sowie in der Verbindungszone zu Stauraum wirksam ist, da die kritischen Erosionsgeschwindigkeiten im Bereich der grössten Ablagerungen erreicht werden (vgl. Abb. 4, 5 und 6). Je nach Korngrösse der abgelagerten Sedimente, können die Bereiche im Staubecken, welche in der Transport- und Ablagerungszone liegen, nicht freigespült werden. Die im Ansatz von Hjulström berücksichtigte Kohäsion der Feinsedimente erklärt, wieso der Spülvorgang bei $d_m = 0.02 \text{ mm}$ weniger effizient ist (Abb. 8b) als bei gröberen Ablagerungen mit $d_m = 0.2 \text{ mm}$ (Abb. 8b).



Abb. 8: Wirksamkeit der Spülung durch Absenken des Stauspiegels um 2 m und Erzeugen einer Durchströmung von 200 m³/s. a) Strömungsbild und Geschwindigkeiten während Spülung. b) Erosions-, Transport- und Ablagerungszonen gemäss Hjulstrom für d_m = 0.02 mm. c) dito für d_m = 0.2 mm. d) dito für 2.00 mm.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Laufwasserkraftwerke an stark sedimentführenden Flüssen mit flächenmässig grossen Stauräumen, die auch Schwall- und Hochwasserwellen dämpfen können, sind mit Verlandungsproblemen konfrontiert, welche die Nachhaltigkeit der Mehrzweckanlage gefährden können. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer innovativen Gestaltung des Zulaufbereiches zum Kraftwerk und der Verbindungszone zum Staubecken dessen Verlandung selbst bei stark sedimentbefrachteten Zuflüssen beherrscht werden kann. Voraussetzung ist allerdings, dass das Staubecken parallel zum Hauptgerinne angeordnet wird und somit die Geschiebedurchgängigkeit gewährleistet ist. Mit einer numerischen 2D Simulation konnte eine vorteilhafte Anordnung gefunden werden, welche eine nachhaltige Nutzung der Mehrzweckanlage in Kombination mit folgenden Massnahmen erlaubt:

- Durchströmung des Staubeckens mit einer minimalen Abfluss von 5 m³/s, welcher durch einen durchlässigen Dammabschnitt gewährleistet wird
- Einstellung des Kraftwerkbetrieb bei grösseren Hochwasser um den Durchgang der Sedimente durch das Wehr zu begünstigen und Ablagerungen im Oberwasserkanal zu limitieren
- Spülung des Stauraumes im Anschluss an Hochwasserereignisse durch kurzzeitiges Absenken des Stauspiegels.

LITERATUR

- [1] Irniger, Ph. : Aménagement à buts multiples sur le Rhône. Diplomarbeit. Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH). Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Februar 2000.
- [2] ECGL: Brigham Young University, SMS v5.08, Reference manual and tutorials, 1996.
- [3] Bollaert, E., Boillat, J.-L. & Golliard, D.: Sedimentation of the artificial lake of Rossinière. Proceedings of the International Conference on Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants-III, Hydropower & Dams, Aqua-Media International Ltd., Aix-en-Provence, 1998.
- [4] Ackers, P. & White, W.R.: Sediment Transport: New Approach and Analysis. Proceedings, ASCE, Vol. 99, HY11, USA, 1973.
- [5] Hjulström, F.: Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. Bulletin, Geological Institute of Upsala, Vol. XXV, Upsala, Sweden, 1935.