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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 105 (2013)

Heft: 2

Artikel: Bewältigung von Geschiebe an Kleinwasserkraftanlagen : Erfolgskontrolle von ausgeführten baulichen und betrieblichen Massnahmen

Autor: Eichenberger, Peter / Scherrer, Ivo / Wiget, Matthias

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941545

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bewältigung von Geschiebe an Kleinwasserkraftanlagen

Erfolgskontrolle von ausgeführten baulichen und betrieblichen Massnahmen

Peter Eichenberger, Ivo Scherrer, Matthias Wiget

Zusammenfassung

Methoden zur Geschiebeabwehr und zum Geschiebeabzug an Wasserfassungen in geschiebeführenden Flüssen sind seit Langem bekannt, doch liegen über deren Wirksamkeit an ausgeführten Anlagen kaum Berichte vor. Am neuen Kraftwerk Mühlau an der Thur in Bazenheid (SG) wurde während 2½ Jahren ein Geschiebemonitoring durchgeführt, welches sich der indirekten Messung des Geschiebetransports mit Geophon-Messkörpern an und in der Wasserfassung bediente.

Aufgrund der Messresultate konnten Schwachstellen der Wasserfassung erkannt und durch die Implementierung von zusätzlichen Massnahmen grösstenteils eliminiert werden. Darüber hinaus wurde das Geschiebemonitoring im Laufe der Projektlaufzeit mehr und mehr zu einem Werkzeug für die Optimierung des Kraftwerkbetriebs im Hochwasserfall und erbrachte damit dem Kraftwerkseigner einen zusätzlichen Nutzen.

1. Problemstellung und Lösungsansatz

Bei bis zu 70% aller Wasserfassungen im Niederdruckbereich werden Probleme mit Geschiebeablagerungen beobachtet, die nicht nur zu Betriebsunterbrüchen während und nach geschiebeführenden Hochwasserereignissen, sondern auch zu regelmässigen Baggerungen mit hohen Kostenfolgen und weiteren Betriebsunterbrüchen führen. Während einige neuartige Kraftwerkskonzepte die übliche Seitenfassung bei Buchtenkraftwerken komplett verlassen (z.B. bewegliches, überströmbares Krafthaus oder das Schachtkraftwerk), halten andere Konzepte an der konventionellen Entnahme fest und schlagen dafür betriebliche und bauliche Massnahmen vor, welche die Geschiebeprobleme mindern können.

Die Methoden des Geschiebeabzugs und der Geschiebeabwehr an Wasserfassungen sind in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts von verschiedenen Versuchsanstalten für Wasserbau intensiv studiert worden (Scheuerlein 1984; Schöberl 1989, Bouvard 1992); Entwurfsprinzipien zu den verschiedenen Massnahmen liegen seit Langem vor, doch ist wenig über deren Wirksamkeit an ausgeführten Anlagen bekannt.

Am neuen Kleinwasserkraftwerk Mühlau an der Thur in Bazenheid (Einzugsgebiet 493 km^2, 1.3 MW elektrische Leistung), welches in der Zeit von Juni 2008 bis Juni 2010 an einer wenig vorteilhaften Innenkurve der Thur gebaut worden ist, wurden vier verschiedene Massnahmen umgesetzt, die sich sowohl der Methode der Geschiebeabweisung als auch des Geschiebeabzugs aus der Wasserfassung bedienen. Die Tauglichkeit und Wirksamkeit dieser Massnahmen wurde mittels Geschiebemonitoring während den ersten 2½ Betriebsjahren dieses Kraftwerks untersucht. Dieses Monitoring bestand aus einer indirekten Messung des Geschiebetransports mit Geophon-Messkörpern an und in der Wasserfassung.

2. Massnahmen zur Geschiebeabweisung am Kraftwerk Mühlau (Thur)

Wie an vielen bestehenden Wasserkraftwerken lag die Wasserfassung der alten Anlage Mühlau in Bazenheid nicht an dem für das Abweisen von Geschiebe optimalen Standort; die Anordnung auf der unvorteilhaften Innenkurve der Thur ging auf historische Tatsachen zurück und liess sich an dieser felsigen Engstelle des Flusses mit Verkehrsübergang auch mit dem Neu- und Ausbau der Anlage in den Jahren 2008 bis 2010 nicht mehr verändern.

Bild 1. Geschiebebaggerungen an einer Wasserfassung eines Niederdruckkraftwerks im Mittelland bei abgesenkter Stauhaltung.

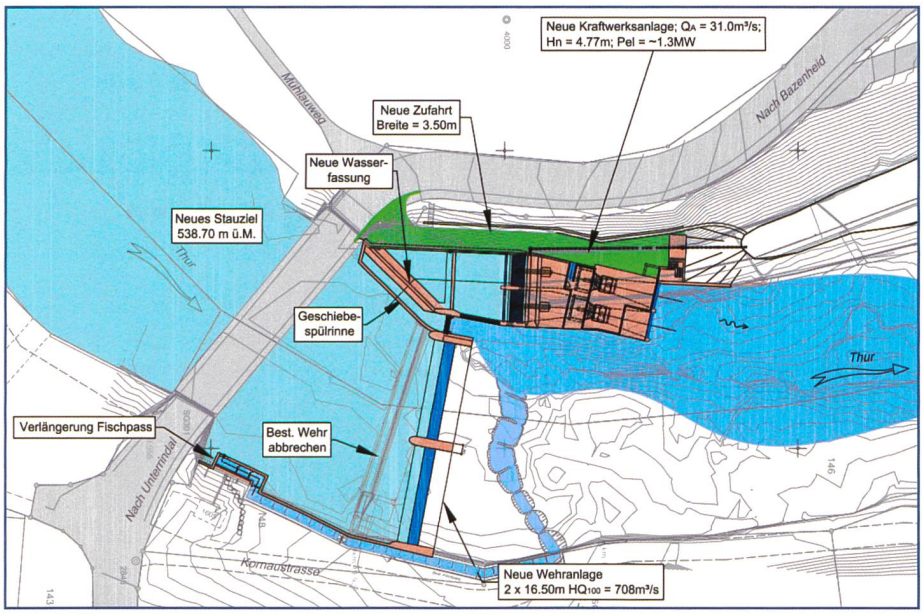


Bild 2. Übersicht über das neue Kraftwerk Mühlau an einer Innenkurve der Thur in Bazenheid (SG); Ausbauwassermenge 31 m³/s.

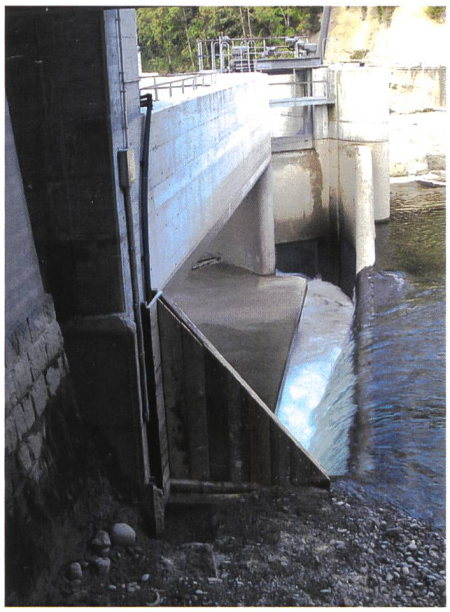


Bild 3. Trennschwelle mit anschliessender Geschiebesammel- und -spülrinne und Grazer Kragschwelle an der Wasserfassung Mühlau bei abgesenkter Stauhaltung.

2.1 Geschiebeabzug durch bauliche Massnahmen

Es ist bekanntlich die sohlennahe Strömung, die im Hochwasserfall Geschiebe in die Wasserfassung trägt und zu Betriebsunterbrüchen führt. Ziel ist es deshalb, diesen sohlennahen Anteil des Triebwassers nicht zu entnehmen, sondern über ein System von Kanälen und Regulierorganen wieder dem Fluss zurückzugeben. Am Kraftwerk Mühlau wurde dies mit den folgenden Massnahmen versucht:

1. Einbau einer Trennschwelle mit anschliessender Geschiebesammel- und Geschiebespülrinne (Breite B = 2.5 m und Länge L = 17 m) vor der eigentlichen Einlaufschwelle der Fassung, die als sogenannte Grazer Kragschwelle ausgebildet wurde. Die Sammelrinne wird mit einem Grundablass B × H = 3 m × 2.75 m gereinigt. Die Kragschwelle soll eine wirbelbehaftete Strömung erzeugen, die das Geschiebe beim Spülen in Suspension halten kann.
2. Einbau einer Wirbelröhre in der Wasserfassung, welche bereits gefasstes Geschiebe einfängt und dem Triebwasser entzieht.
3. Einbau einer Spülschütze vor der Rechenanlage, mit welcher abgelagertes Geschiebe lokal in die Thur zurückgespült werden kann.

2.2 Geschiebeabweisung durch betriebliche Massnahmen

Erfahrene Hydrauliker definieren die Kunst der Geschiebeabwehr bei Wasserfassungen mit der griffigen Formel: den Fluss die Arbeit selber machen lassen! Durch eine günstige Nutzung der Sekundärströmung in Flussbiegungen, welche die Aussenseite einer Kurve geschiebefrei hält, soll der Fluss das mitgeführte Geschiebe im Hochwasserfall neben der Fassung vorbei ins Unterwasser lenken. Falls eine solche Biegung wie beim Kraftwerk Mühlau fehlt, kann durch einen asymmetrischen Betrieb der Wehrklappen eine künstliche Biegung provoziert werden, welche das Geschiebe durch die Spiralströmung in der Kurve weg von der Fassung treibt. In Mühlau werden die beiden Wehrklappen im Hochwasserfall so gesteuert, dass sich zuerst das orografisch rechte Wehrfeld öffnet, während die linke Wehrklappe geschlossen bleibt (siehe *Bild 2*). Wie die vorliegende Untersuchung zeigt, funktioniert diese Massnahme aber nur innerhalb bestimmter Grenzen und kann nicht als Universallösung angewandt werden.

2.3 Dimensionierung

Der Grundablass anschliessend an die Geschiebesammelrinne und das Abschlussorgan der Wirbelröhre werden im Hochwasserfall automatisch geöffnet und zwar ab einem Abfluss der Thur von bereits ca. 70 m³/s. Obwohl der eigentliche Geschiebetrieb in der Thur im Gewässerabschnitt Lütisburg–Bazenheid erst bei ca. 130 m³/s beginnt (Aufreissen der Deckschicht), gibt es auch schon bei geringeren Abflüssen lokale Geschiebebewegungen, die zu Ablagerungen an der Fassung führen können.

Bei Hochwasser mit Geschiebetrieb wird permanent mit ca. 16 m³/s gespült, was einer Öffnung des Grundablasses von weniger als 1/3 entspricht. An diese eher geringe Öffnung hat man sich erst im Laufe des Projekts herangetastet; es ist ein Kompromiss aus zwei gegensätzlichen Anforderungen: einerseits eine eher geringe Öffnung, um die Entnahmewassermenge und den Geschiebeeinzug nicht unnötigerweise zu erhöhen, aber andererseits eine genügend grosse Öffnung, um die Spülwirkung des Grundablasses nicht zu unterbinden und keine Verklausung zu provozieren.

Die Wirbelröhre ist auf ein Grösstkorn von 60 mm ausgelegt und transportiert bei geöffnetem Abschlussorgan im Hochwasserfall rund 1.25 m³/s Wasser aus der Wasserfassung. Die Dimensionierung erfolgte in Anlehnung an Versuche an der TU München in Obernach (Mtalo 1988) und der VAW/ETHZ (Schmidt/Bezzola 2002).

Die Spülschütze direkt vor dem Einlaufrechen ist nicht für eine kontinuierliche Spülung während Hochwasserereignissen gedacht, da ohne ein Absenken des Stauzieles nur unmittelbar am Organ ein Spüleffekt erzielt werden kann; für weiter entfernte Ablagerungen bleibt die Spülwirkung aus. Diese Spülschütze wird deshalb nur manuell während Reinigungsarbeiten bedient.

3. Konzept zur Überprüfung der Wirksamkeit der Massnahmen

3.1 Geschiebemonitoring mittels Geophonen

Das Messen von Geschiebebewegungen in der Natur während Hochwasserereignissen stellt auch heute noch eine

zentrale Herausforderung der Geschiebetransportforschung dar (Rickenmann 2007). Nach eingehender Evaluation der verschiedenen Messmethoden wurde der Einzug von Geschiebe in die Wasserfassung des KW Mühlau indirekt mit Hilfe von in die Sohle integrierten Geophon-Messkörpern gemessen. Gesteinskörner, die auf die Stahl-Abdeckplatte der Messkörper aufschlagen, verursachen Vibrationen, die über die Geophone in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Anhand der Signale kann ein Mass für den Geschiebetrieb durch den Messquerschnitt extrahiert werden.

Die Geophone werden in verschiedenen Messquerschnitten entlang des Triebwasserwegs installiert, sodass sich die Wirksamkeit der oben aufgeführten Massnahmen im Einzelnen bestimmen lässt. Beim Entwurf der Messanordnung wurde vor allem auf den bereits im Einsatz stehenden Geophon-Systemen der Eidg. Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft (WSL) aufgebaut, die für das Detektieren von Murgängen eingesetzt werden (Turowski 2008). Die Abmessungen der Messplatten pro Geophon (400 mm × 800 mm) wurde jedoch gegenüber dem WSL-System vergrössert, um die Kontrollquerschnitte im Triebwasserweg mit einer möglichst geringen Anzahl Geophonen vollständig abdecken zu können. Dadurch konnten die Kosten in einem vernünftigen Rahmen gehalten werden. Schlussendlich wurden 22 Messplatten mit dazugehörenden Geophonen installiert (siehe *Bild 4*): eine erste Reihe von 11 Platten an der Trennschwelle vor der Fassung, eine zweite Reihe von 10 Platten nach der Wirbelröhre in der Fassung vor dem Feinrechen und eine einzelne Platte am Auslauf der Wirbelröhre.

Die Messplatten mussten mit einer Körperschalldämmung vom Gehäuse getrennt gelagert werden, sodass sich die Impulse nicht auf benachbarte Platten übertragen. Die Gehäuse wurden anschliessend noch mit einer Holzverschalung umgeben, damit Geschiebe und Geschwemmsel keine Schäden an den Gehäusen und den abgehenden Kabelschutzrohren verursachen konnten (siehe *Bild 5*).

Für die Registrierung und Auswertung der Signale (nur jene über einem bestimmten Grenzwert zur Eliminierung von Hintergrundrauschen) wurde ein Datenerfassungsgerät eingesetzt, welches zusammen mit einem Laptop-Computer in einem Schaltschrank vor Ort installiert wurde. Auf dem Laptop wurde eine Software installiert, welche die Signale laufend auswertete und Einschlagsimpulse herausfilterte. Das Auswertegerät wurde auf jedem Geophon-Kanal einzeln gegen Überspannungen aus Blitzschlag gesichert. Zusätzlich im Schaltschrank eingebaut wurde ein Modem, welches über das GSM-Netz täglich Status- und wenn nötig Alarmmeldungen an die Projektverantwortlichen sendete.

3.2 Messkampagnen

Die Anlage war Mitte Juli 2010 betriebsbereit. Noch vor dem Aufstau der Stauhaltung ereignete sich am 17./18. Juli 2010 ein kleines Hochwasser, welches eine kleine Menge Geschiebe (0.250 m^3 ohne Sandanteile) über die zweite Geophon-Reihe in die Wasserfassung spülte. Mit den dabei ausgelösten Impulsen konnte eine grobe Eichmessung durchgeführt werden, welche die Anzahl Impulse zum Geschiebevolumen in Beziehung bringt. Es konnte ein Verhältnis von rund 13 000 Impulsen pro m^3 Geschiebe mit einem Korndurchmesser >10 mm bestimmt werden.

Für die Analyse der Hochwasserereignisse wurden jeweils die Abflussgang-

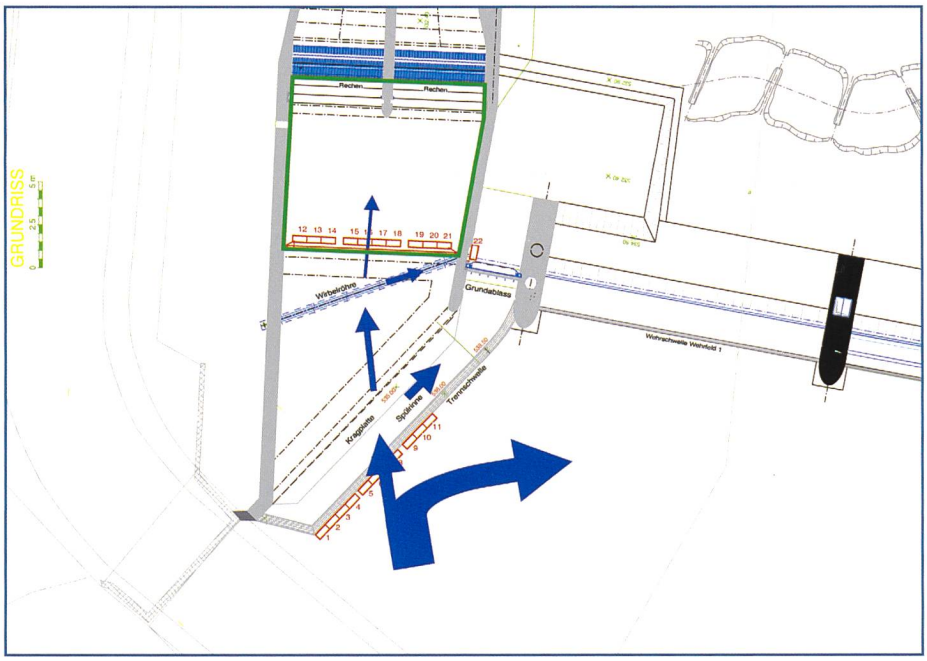


Bild 4. Anordnung der Geophone, nummeriert, vor und in der Wasserfassung des KW Mühlau; der erwartete Weg des Geschiebes ist als Arbeitshypothese schematisch eingezeichnet (blaue Pfeile).

Bild 5. Zweite Geophon-Plattenreihe mit Holzverschalung nach der Wirbelröhre (Schlitz in Einlaufsohle) kurz nach der Montage.

linien des Pegels Thur-Jonschwil der Landeshydrologie (LH 2303) herangezogen, der in nur 300 m Entfernung flussabwärts des Kraftwerks liegt. Zwischen Juli 2010 und Dezember 2012 konnten insgesamt 14 Hochwasserereignisse mit Geschiebetrieb aufgezeichnet und analysiert werden. Das Hochwasserereignis vom 10. Oktober 2011 verzeichnete mit knapp 300 m^3/s den grössten Spitzenabfluss der 30 Monate dauernden Messkampagne. Dieses grösste analysierte Ereignis hat eine Wiederkehrperiode von knapp 2 Jahren.

4. Analyse der Messresultate

4.1 Beginn des Geschiebetriebs

Der Flussabschnitt im Bereich der Wehr- und Kraftwerksanlage Mühlau befindet sich praktisch im Gleichgewichtszustand, d.h., das Geschiebe aus dem Thur-Oberlauf wird ohne Erosionen oder Auflandungen durchtransportiert. Die Kornverteilung des Geschiebes ist sehr breit. Der mittlere Korndurchmesser d_m beträgt dabei für das Grundmaterial 6.7 cm, während d_{50} mit 5.9 cm und d_{90} mit 13.8 cm bestimmt werden konnten. Das Material der Deckschicht, welche die Stabilität des Gerinnes resp. den Geschiebetrieb bestimmt, ergibt folgende Kornzusammensetzung: d_m = 10.8 cm, d_{50} = 10.9 cm und d_{90} = 17.5 cm. Der Geschiebetrieb in diesem Abschnitt oberhalb des Kraftwerks mit einem geschätzten Energieliniengefälle von J_E = 3.5‰ bis 4.5‰ setzt mit dem Aufbrechen der Deckschicht ein, was bei Abflüssen in der Thur von Q_0 = 120 m^3/s bis 160 m^3/s auftritt.

Dieses theoretische Ergebnis konnte nun durch die Messresultate der Geophone an der Trennschwelle vor der Fassung bestätigt werden. Obwohl der Grundablass bereits bei ca. 70 m^3/s geöffnet wird, konnte erst ab einem Thur-Abfluss von ca. 130 m^3/s eine markante Zunahme der Impulse auf den Geophon-Messkörpern Nr. 1 bis 11 registriert werden. *Bild 7* zeigt aber auch, dass der Geschiebetrieb nicht stetig ist, sondern schubartig verläuft. Darüber hinaus ist auch der Einfluss des Turbinendurchflusses sichtbar, der bei höheren Thur-Abflüssen abnimmt (Unterwasserniveau steigt an) und die gefasste Wassermenge und entsprechend den Geschiebeeinzug über die Trennschwelle reduziert.

Bild 6. Beginn des Hochwasserereignisses vom 27. Juli 2010 vom Unterwasser der neuen Wehranlage aus gesehen.

4.2 Geschiebeeinzug in die Wasserfassung

Die Frage, welcher Anteil des Geschiebes jeweils während den Hochwasserereignissen in die Wasserfassung gezogen wird, konnte mit der Analyse der Messdaten der zweiten Reihe (Geophon-Messkörper Nr. 12 bis 21 in der Fassung vor dem Rechen gemäss *Bild 4*) untersucht werden.

Bei der Kontrolle der Fassungssohle vor dem Rechen wurden jeweils im Anschluss an die ersten Hochwasserereignisse nach der Inbetriebnahme nur ganz geringe Geschiebemengen und erwartungsgemäss eine geringe Anzahl Einschlagsimpulse registriert. Nach den ersten vier Hochwasserereignissen zwischen Juli und September 2010 bekam man das Gefühl, dass die umgesetzten Massnahmen zur Geschiebeabwehr überdurchschnittlich gut funktionieren würden. Das änderte sich jedoch schlagartig: Beim Ereignis vom 12. November 2010 handelte es sich um ein kleines Hochwasserereignis mit einem Spitzenabfluss von nur 160 m^3/s (also nur knapp über dem eigentlichen Beginn des Geschiebetriebs). Trotzdem wurde im Vergleich zu den vorangehenden Ereignissen ein erhöhter Geschiebeeintrag in die Fassung registriert. Der resul-

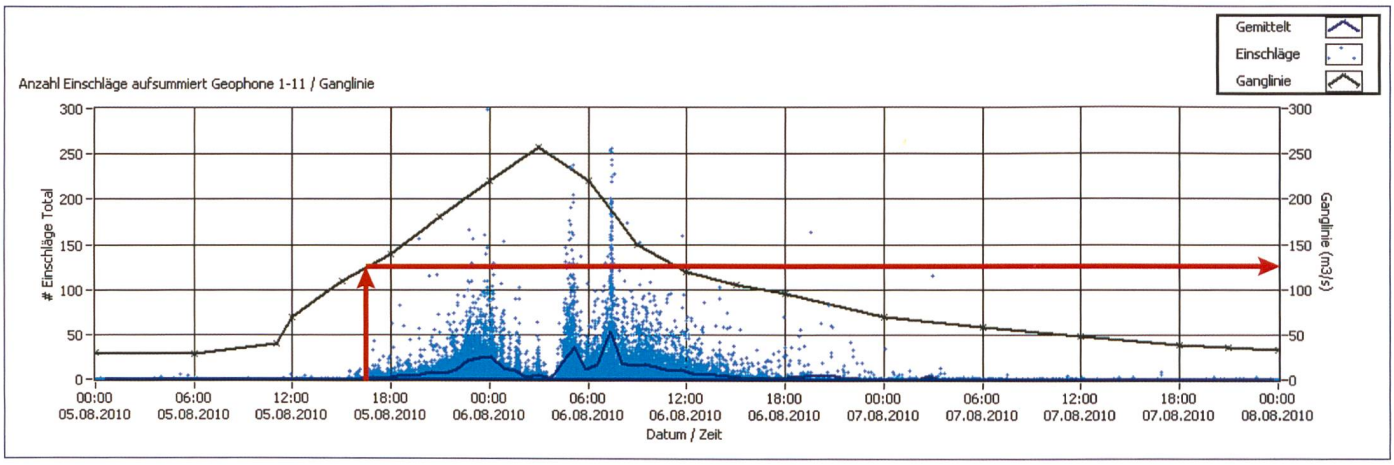


Bild 7. Impulse auf die Geophone Nr. 1 bis 11 hinterlegt mit dem Hydrograf (schematisch) des Pegels Thur-Jonschwil LH 2303 für das Ereignis vom 6. August 2010. Markiert ist der Beginn des Geschiebetriebs.

tierende Geschiebeeintrag konnte aus den Messungen zu ca. 1 m^3 mit Korngrössen >10 mm geschätzt werden.

Die gleichen Ergebnisse mit hohen Einschlägen auf den Geophonen Nr. 11 bis 21 (in der Fassung vor dem Rechen) wurden während den nachfolgenden Hochwasserereignissen vom 9. Dezember 2010, vom 30. Juni 2011 und vom 13. Juli 2011 registriert. Die Schätzung der Geschiebemengen liess vermuten, dass sich mittlerweile mehrere Kubikmeter Geschiebe mit Korndurchmesser >10 mm in der Wasserfassung befinden müssten.

Aufgrund dieser Vermutung aus dem Geschiebemonitoring wurden in Absprache mit dem Besitzer und Betreiber des Kraftwerks, dem Regionalwerk Toggenburg AG (rwt) Kirchberg, am 30. August 2011 Profil- und Fotoaufnahmen durch einen Taucher durchgeführt. Es wurden neben Geschiebeablagerungen auch Baumstämme, Wurzelstöcke und andere Baumteile vor dem Rechen vorgefunden. Das Volumen der gesamten Ablagerungen konnte aufgrund der Profilaufnahmen zu rund 61 m^3 bestimmt werden, welche auf einer Fläche von ca. 60 m^2 lagerten.

Das Ausmass der Ablagerungen bewog die Betreiberin dazu, das Material während der Niederwasserperiode vom September 2011 entfernen zu lassen:

- Anfänglich wurde das Schwemmholz mit einem Autokran mit Greifer unter Mithilfe eines Tauchers gehoben; die darunterliegenden Geschiebe-, Sand- und Geschwemmselablagerungen wurden anschliessend mit Hilfe einer Injektorpumpe, die vom Taucher eingesetzt und schrittweise verschoben wurde, in den Grundablass gepumpt. Diese Arbeit gestaltete sich sehr zeitintensiv; Taucher und Gehilfe waren rund fünf Arbeitstage lang damit beschäftigt, ca. 50 m^3 Geschiebe und Sedimente unter Wasser zum Grundablass zu verschieben.
- In der Zwischenzeit hatte die Betreiberin des Kraftwerks bei den kantonalen Behörden ein Gesuch für eine vollständige Absenkung der Stauhaltung eingereicht. Nachdem die Bewilligung vorlag, wurde die Stauhaltung in der Woche vom 26. September 2011 abgesenkt und das Material mit einem Saugwagen hochgepumpt und entsorgt. Eine Rückgabe an das Gewässer kam nicht in Frage, weil auch Ablagerungen (von ca. 30 m^3) hinter dem Rechen vorgefunden wurden, die vor allem Feinanteile mit Geschwemmsel enthielten.

Dieses sandige, schlammige Feinmaterial <10 mm Durchmesser wie auch die Baumstämme vor den Rechen wurden von den Geophon-Messkörpern nicht registriert; so konnte das gesamte Ausmass der Ablagerungen in der Fassung vom Geschiebemonitoring-System nicht vollständig erfasst werden.

Die Analyse der Hochwasserereignisse zwischen Juli 2010 und Juli 2011 zeigte Folgendes:

- Bei den ersten Hochwasserereignissen im Sommer 2010 waren die Abflüsse relativ geschwemmselarm. Erst ab Herbst/Winter kamen jeweils grosse Mengen Geschwemmsel und Schwemmholz hinzu, die Probleme beim Grundablass verursachten. Dieser musste zeitweise von Hand gefahren werden und konnte wegen Antriebsstörungen nicht konsequent durch das Hochwasserereignis hindurch offen bleiben, sodass der Geschiebeabzug an der Grazer Kragschwelle unwirksam wurde.
- Während den ersten, erfolgreich gemeisterten Hochwasserereignissen zwischen Juli und September 2010 waren noch nicht beide Turbinen der Anlage im Dauerbetrieb. Erst ab Herbst/Winter wurden die beiden Maschinengruppen auch im Hochwasserfall im Automatikbetrieb mit maximaler Leistung gefahren. Dabei betrug die turbinierte Wassermenge immer nahezu 30 m^3/s; entsprechend hoch war auch der Einzug an Geschiebe in die Fassung.
- Der Vergleich der Daten zwischen der ersten und der zweiten Messkörperreihe während den Hochwasserereignissen von November 2010 bis Juli 2011 zeigte auf, dass grössere Mengen an Geschiebe an der ersten Messkörperreihe vorbei in die Fassung gelangt sein mussten, für die es aus der Datenanalyse vorerst keine Erklärung gab. Anlässlich der abgesenkten Stauhaltung im September 2011 fiel aufgrund von Verfärbungen an der Wand und von Ablagerungen auf, dass das Geschiebe vorwiegend der bergseitigen Kanalwand entlang in die Fassung gespült worden sein musste. Die nicht plankonform ausgeführte Trennschwelle am oberen Ende des Spülkanals (siehe *Bild 9*) erlaubte offensichtlich grossen Mengen an Geschiebe über die Sammelrinne zu springen und dabei auch an der ersten Messkörperreihe vorbei in die Fassung zu gelangen.

5. Zusätzliche Massnahmen und deren Überprüfung

Die aufwendige Reinigung der Fassung vom September 2011 zeigte, dass die Geschiebeabwehrmassnahmen noch nicht überzeugten. In Absprache mit der Bauherrschaft wurden noch während der abgesenkten Stauhaltung die folgenden baulichen Massnahmen ergriffen (siehe *Bild 10*):

1. Ausschneiden der Kragplatte an der Einlaufschwelle, um die lichte Weite des Spülkanals von 1.5 m auch am oberen Ende zu erreichen.

Bild 8. Vorgefundene Ablagerungen hinter dem Rechen, nachdem die Stauhaltung Ende September 2011 aufgegeben und die gesamte Wasserfassung sowie die Turbineneinläufe entwässert worden waren.

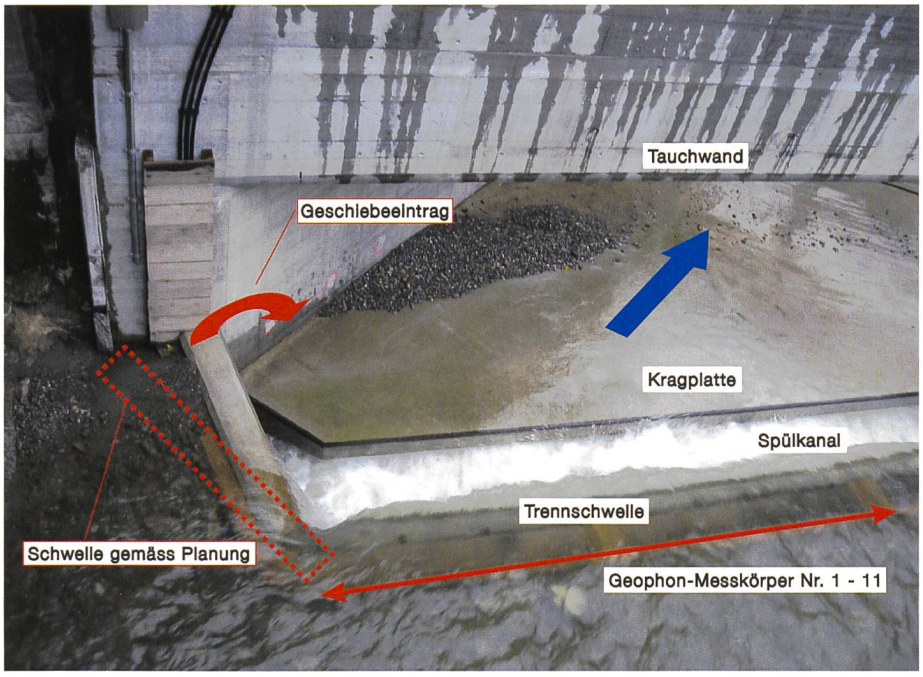


Bild 9. Geschiebe überspringt die Rinne an dessen oberen Ende, weil dort die Breite ungenügend ist / nicht nach Plan gebaut werden konnte.

Bild 10. Zusätzliche Massnahmen zur Geschiebeabwehr an der Fassung: a) Zurückschneiden der Kragschwelle und b) Sporn aus Holz.

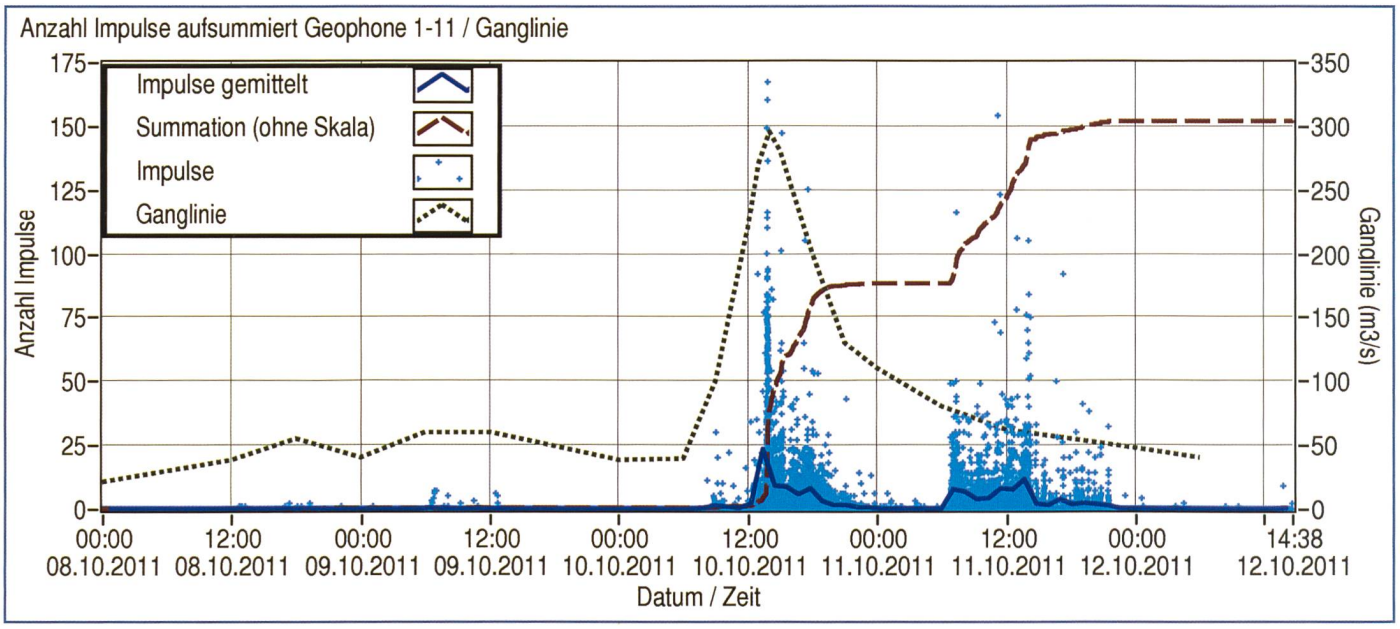


Bild 11. Impulse auf die Geophone Nr. 1 bis 11 hinterlegt mit dem Hydrograph (schematisch) des Pegels Thur-Jonschwil LH 2303 für das Ereignis vom 10./11. Oktober 2011.

2. Einbau eines Sporns aus Holz, welcher den Eintrag von Geschiebe entlang der bergseitigen Ufermauer direkt in die Fassung verhindern soll. Im Sommer 2012 wurde dieser Sporn in Beton ausgeführt und damit als permanente Einrichtung etabliert.

Zudem wurde auch eine weitere betriebliche Massnahme eingeführt: Der Turbinendurchfluss wird ab einem Thur-Abfluss von 100 m^3/s gedrosselt, und zwar werden die Turbinenöffnungen auf 50% des Maximalwertes zurückgesetzt. Je nach Höhe des Unterwasserspiegels und damit der anstehenden Fallhöhe entspricht dies einer Drosselung des Turbinendurchflusses um 50% und mehr. Mit dieser betrieblichen Massnahme sollen neben dem Geschiebeeintrag auch das Einziehen von Schwemmholz in die Fassung reduziert werden. Der Energie- und Ertragsverlust durch diese Drosselung kann wie folgt abgeschätzt werden:

- Bei einem Thur-Abfluss von 100 m^3/s und mehr kann ohne Drosselung eine Leistung von rund 1.0 MW gefahren werden. Mit der Drosselung sind es noch rund 500 kW.
- Am KW Mühlau treten Abflüsse von >100 m^3/s im Durchschnitt an rund sechs Tagen im Jahr auf. Der Jahresverlust beträgt damit rund 144 Stunden × 500 kW = 72 000 kWh.
- Bei einem Marktpreis von Rp. 8/kWh für Bandenergie beträgt der Verlust weniger als CHF 6000.–/Jahr. Wird mit der kEV-Vergütung von rund Rp. 18/kWh gerechnet, beträgt der Verlust ca. CHF 13 000.–/Jahr.
- Die Aufwendungen für die Bergung von Schwemmholz mittels Autokran sowie die Reinigung der Fassung mit Taucher

und Saugwagen, jeweils unterstützt durch mindestens zwei Betriebswarte der rwt, kosteten hingegen mehr als der Wert dieser Produktionsverluste.

Die im September 2011 ausgeführten zusätzlichen Massnahmen zur Geschiebeabwehr konnten im Hochwasserereignis vom 10./11. Oktober 2011 bereits ausgiebig geprüft werden, war doch dieses Ereignis mit einem Spitzenabfluss von fast 300 m^3/s das grösste der gesamten Monitoring-Periode.

Der Geschiebeeinzug in die Fassung konnte sehr gering gehalten werden; an der zweiten Messkörperreihe in der Fassung (Geophon-Messkörper Nr. 12 bis 21) wurde weniger als 0.25 m^3 Geschiebe mit Korndurchmesser > ca. 10 mm registriert. Dies ist wohl zu einem grossen Teil auf die positive Wirkung der Turbinendrosselung zurückzuführen, denn auch an der ersten Messkörperreihe an der Trennschwelle (Geophon-Messkörper Nr. 1 bis 11) wurden weit weniger Impulse registriert als während früheren Hochwasserereignissen. Das durch den Grundablass gespülte Geschiebe kann zu ca. 4 m^3 bestimmt werden, während der gesamte Geschiebetrieb (Korngrössen >10 mm) in der Thur beim Hochwasserereignis vom 10./11. Oktober 2011 auf ca. 550 m^3 geschätzt werden kann.

Aus *Bild 11* lässt sich auch erkennen, dass beim manuellen Aufheben der Turbinendrosselung durch den Betriebswart um 06:00 Uhr des 11. Oktober 2011 wieder eine markante Zunahme des Geschiebetriebs über die Trennschwelle (Geophon-Messkörper 1 bis 11) erfolgte, die noch bis zum Schliessen des Grundablasses bei einem Thur-Abfluss von ca. 50 m^3/s anhielt (Hysterese der Hubschützenregelung: Öffnen bei 70 m^3/s; Schliessen bei 50 m^3/s).

Diese Erscheinung kann als Rückwärts-Erosion an der Trennschwelle gedeutet werden: Am offenen Grundablass steht noch ein hoher Gradient an, der Geschiebe an der Trennschwelle zu bewegen vermag, während der Geschiebetrieb in der Thur bereits zum Erliegen gekommen ist.

6. Wirksamkeit der Abwehrmassnahmen

6.1 Geschiebeabweisung (betriebliche Massnahme)

Bei Wasserfassungen aus geschiebeführenden Flüssen wird man immer versuchen, das Geschiebe abzuweisen, bevor es die Fassung erreicht. Dies kann mit Hilfe von Sekundärströmungen, wie sie in Flussbiegungen vorkommen, sehr gut gelingen, aber nur wenn:

a) die Fassung an die Aussenseite der Krümmung gelegt wird und
b) nach der Entnahme noch genügend Wasser im Fluss verbleibt, um die geschiebeabweisende Strömung aufrechtzuerhalten und das Geschiebe an der Fassung vorbeizutransportieren. Nach Bouvard 1992 soll das Verhältnis des Gesamtabflusses bei Geschiebetriebbeginn Q_c zur gefassten Wassermenge Q_A mehr als 3 betragen, also $\alpha_Q = Q_c/Q_A > 3.0$, um eine sichere Geschiebeabweisung zu ermöglichen.

Modellversuche zeigen, dass bei einer Anordnung der Fassung an der Innenkurve eines Flusses und bei einer Entnahme von 50% des Abflusses praktisch das gesamte Geschiebe in die Fassung gezogen wird. Am KW Mühlau mit der Fassung an der Innenkurve, also genau dort, wo sie nicht sein sollte, wurde diese ungünstige Ausgangslage mit den folgenden Massnahmen zu korrigieren versucht:

a) Im Hochwasserfall werden die beiden Wehrklappen so gesteuert, dass durch Öffnen der fassungsfernen Klappe eine Krümmung im Strömungsverlauf und dadurch eine Spiralströmung entstehen soll; es kann eine künstliche Flussbiegung geschaffen werden. Die sohlennahe Strömung soll dabei das Geschiebe weg von der Fassung in Richtung der geöffneten Wehrklappe treiben. Bis zu einem Thur-Abfluss von rund 250 m^3/s lässt sich dieser Zustand aufrechterhalten; für höhere Thur-Abflüsse muss die fassungsnahe

Bild 12. Geschiebeabweisung durch unsymmetrische Klappenöffnung bei Thur-Abflüssen bis ca. 250 m^3/s.

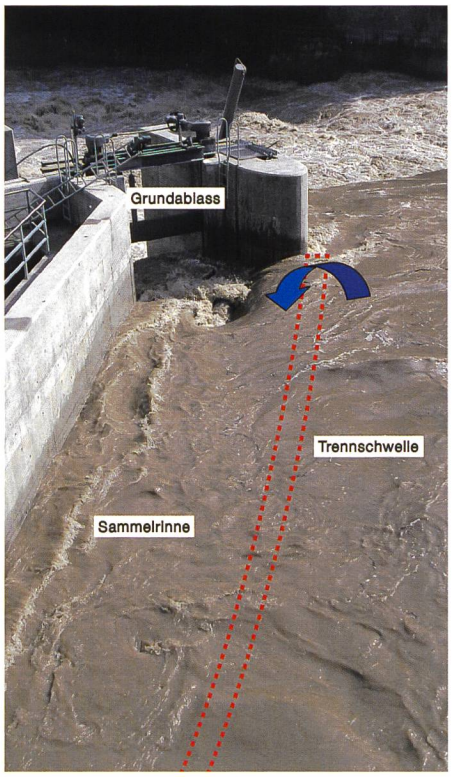


Bild 13. Vollständiges Öffnen des Grundablasses wegen Schwemmholzproblemen erzeugt – trotz markantem Anstieg der Trennschwelle zum Pfeiler hin – vor allem eine starke Strömung in Schützennähe und entsprechend hohem Geschiebeeinzug, was durch die Impulszunahme auf den dortigen Geophonen nachgewiesen werden konnte.

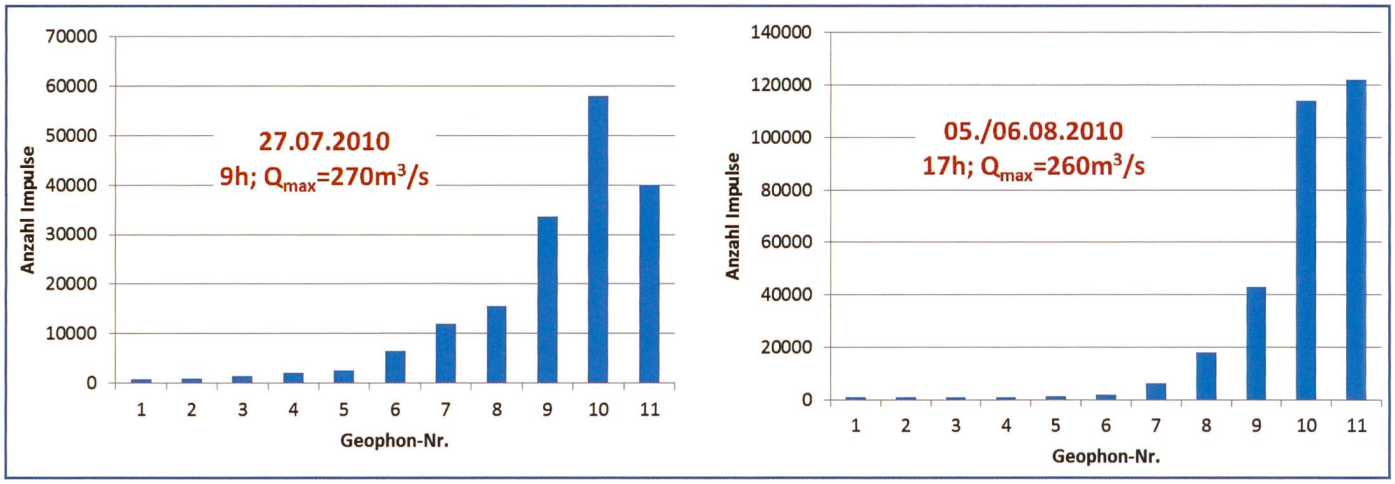


Bild 14. Verteilung der Impulse auf der ersten Messkörperreihe (Trennschwelle) während zweier Hochwasserereignisse des Jahres 2010 mit Angabe der Dauer des Geschiebetriebs (Q_{Thur} >130 m³/s) und des Spitzenabflusses.

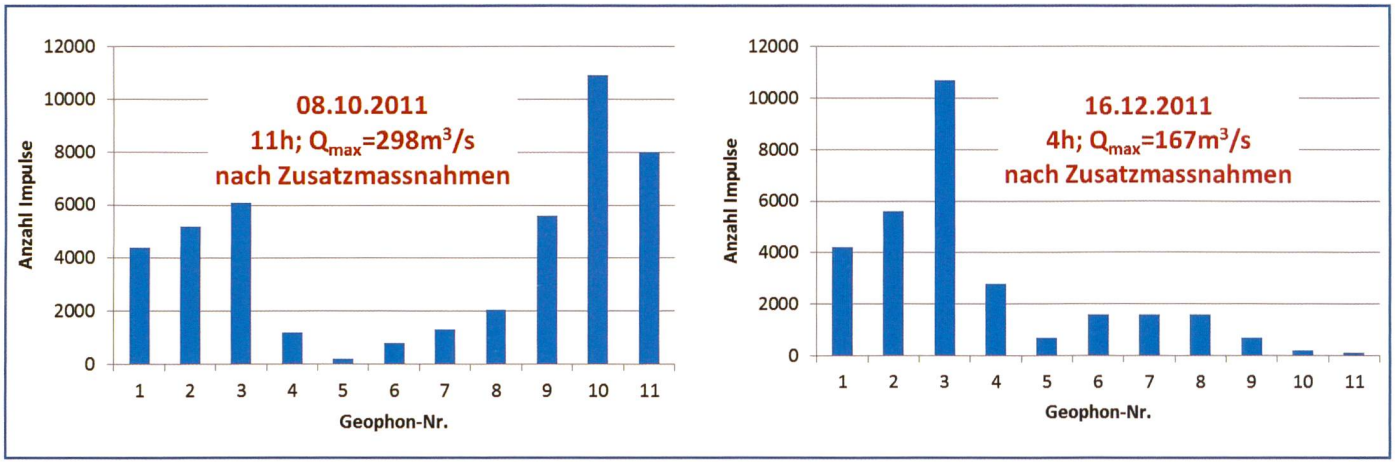


Bild 15. Verteilung der Impulse auf der ersten Messkörperreihe (Trennschwelle) nach Ausführung der Zusatzmassnahmen des Jahres 2011 mit Angabe der Dauer des Geschiebetriebs (Q_{Thur} >130 m³/s) und des Spitzenabflusses.

Klappe auch umgelegt werden und der Krümmungseffekt nimmt ab.

b) Das Verhältnis α_Q des Gesamtabflusses bei Geschiebetriebbeginn Q_c zur gefassten Wassermenge Q_A wurde dadurch verbessert, dass der Grundablass nicht vollständig, sondern nur 80 cm hoch geöffnet wird, so dass ein Abfluss durch den Grundablass von nur ca. 16 m³/s besteht. Damit wird eine gesamte Wassermenge Q_A von rund 48 m³/s abgezweigt, nämlich 31 m³/s durch die Turbinen, 1.25 m³/s über die Wirbelröhre und 16 m³/s über den Grundablass, so dass sich zu Beginn des Geschiebetriebs bei einem Thur-Abfluss von ca. 130 m³/s ein Verhältnis α_Q von rund 2.7 ergibt, was knapp der Empfehlung entspricht. Würde der Grundablass vollständig gezogen (2.75 m hoch), was einem Ausfluss von rund 52 m³/s entspricht, so würde sich das Verhältnis α_Q auf rund 1.5 verschlechtern. Der Grundablass wird jeweils nur für kurze Zeit zum Spülen von Treibholz und anderem grossem Schwemmgut ganz geöffnet.

Diese beiden betrieblichen Massnahmen konnten nicht bei allen Hochwasserereignissen konsequent umgesetzt werden. Es gab Situationen, während denen sowohl der Grundablass wie auch die Wehrklappen wegen grossem Schwemmholzanfall nicht nach den Vorgaben geöffnet werden konnten.

6.2 Geschiebeabzug 1: Trennschwelle mit anschliessender Geschiebesammelrinne

Die Wirkung des Geschiebeabzugs durch die Sammelrinne konnte aufgrund der Differenz zwischen den Impulsen auf der ersten und zweiten Messkörperreihe nachgewiesen werden. Mit Ausnahme der Ereignisse vom November 2010 und Juli 2011, bei welchen ein hoher Geschiebeeintrag über das nicht plangemäss ausgeführte obere Ende der Sammelrinne festgestellt wurde, war die Wirkung gut. Die Impulse auf der 2. Messkörperreihe und damit der Geschiebeeintrag in die Fassung waren um ein Vielfaches geringer als die Impulse auf der 1. Messkörperreihe.

Entscheidend beim Geschiebeabzug durch eine Sammelrinne mit anschliessendem Grundablass ist aber die Frage der abnehmenden Spülwirkung mit zunehmender Distanz vom Grundablass. Am Kraftwerk Mühlau ist die Sammelrinne 17 m lang. Bei einer Grundablassöffnung von nur B × H = 3.0 m × 0.8 m wären – ohne Ausbildung einer vorteilhaften Spiralströmung – am oberen Ende der Sammelrinne Ablagerungen zu erwarten. Solche konnten nach den total 14 Hochwasserereignissen auch verschiedentlich festgestellt werden. Ein guter Indikator für das ablagerungsfreie Funktionieren der Sammelrinne war eine gleichmässige Verteilung des geschiebebehafteten Zuflusses über die gesamte Rinnenlänge. Die *Bilder 14* und *15* zeigen die Summen der Messkörperimpulse auf der Trennschwelle für ausgewählte Hochwasserereignisse vor und nach der Ausführung der Zusatzmassnahmen.

Die Interpretation der gesammelten Daten zeigte Folgendes:

1. Bei kleineren Hochwasserereignissen mit geringen Spitzenabflüssen ist eine relativ gleichmässige Verteilung des geschiebebehafteten Zuflusses über

die gesamte Rinnenlänge vorhanden.

2. Bei grösseren Ereignissen konzentrierte sich der geschiebebehaftete Zufluss mehr und mehr auf den pfeilernahen Bereich; die Tendenz zu Geschiebeablagerungen am oberen Ende der Geschiebesammelrinne nahm zu; das entsprach der Beobachtung bis zur Ausführung der Zusatzmassnahmen.
3. Mit den nachträglich eingeführten Zusatzmassnahmen, insbesondere dem Einbau des Sporns am oberen Ende der Sammelrinne/der Fassung änderte sich die Verteilung auch für grosse Abflussereignisse. Der Sporn produziert offensichtlich Verwirbelungen, die auch über die Geophone 1 bis 4 geschiebebehafteten Zufluss bewirken. Dass diese nicht einfach zu einem zusätzlichen Eintrag von Geschiebe und zu Ablagerungen am oberen Ende der Sammelrinne und schliesslich zu einer Zunahme des Geschiebeeinzugs in die Fassung führten, konnte anhand der Impulse auf der 2. Messkörperreihe in der Fassung leicht festgestellt werden: Die Impulse blieben gering und Ablagerungen am Rechen wurden kaum festgestellt.

Die Anzahl der Impulse in den obigen Darstellungen (Achtung: Skalen sind nicht in jedem Bild einheitlich) sind nicht eine direkte Funktion des Thur-Abflusses, sondern hängen von verschiedenen anderen Faktoren ab. So kann der Geschiebetrieb bei gleichen Thur-Abflüssen unterschiedlich sein, je nachdem welcher Teil des 493 km^2 grossen Einzugsgebiets besonders zum Hochwasserereignis beigetragen hat und entsprechend seiner Beschaffenheit ein grösseres oder kleineres Geschiebeaufkommen ermöglichte.

6.3 Geschiebeabzug 2: Wirbelröhre

Die Wirksamkeit der Wirbelröhre konnte nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, da die Aufzeichnungen des Geophons Nr. 22 am Auslauf der Röhre durch zusätzliche Schwemmholzeinschläge gestört worden waren, die schliesslich zum Abreissen und zum Verlust des Geophon-Messkörpers führten.

Anlässlich von Stauraumabsenkungen wurde beobachtet, dass der 60 mm breite Schlitz der Wirbelröhre durch festgeklemmte Steine teilweise belegt war und die Wirkung dieser Massnahme wohl reduzierten. Es muss davon ausgegangen werden, dass die 10.8 m lange Wirbelröhre wegen Verklausungstendenz nicht immer über die gesamte Kanalbreite wirksam ist.

Bild 16. Wirbelröhre mit teilweiser Verklausung des 60 mm breiten Schlitzes, links die Geophone der zweiten Reihe.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die baulichen und betrieblichen Massnahmen zur Abwehr von Geschiebe an der Wasserfassung des Kraftwerks Mühlau funktionieren mittlerweile, nach rund 2½ Jahren Betrieb der Anlage, zufriedenstellend. Das war jedoch nicht immer so: Massive Geschiebeablagerungen in der Fassung nach einigen Hochwasserereignissen im Herbst/Winter 2010/11 liessen zuerst heftige Zweifel an der Wirksamkeit der Massnahmen aufkommen. Nur dank der Erkenntnisse aus dem Betrieb der Geschiebe-Monitoring-Anlage konnten die Mechanismen des Geschiebetriebs an der Fassung zusammen mit Beobachtungen anlässlich von Stauabsenkungen analysiert und bis zu einem gewissen Grad verstanden werden. Daraus konnten Schwachstellen erkannt und durch die Implementierung von zusätzlichen Massnahmen grösstenteils eliminiert werden.

Es zeigte sich schon zu Beginn des Projekts, dass die Prozesse des Feststofftransports während eines Hochwasserereignisses schubweise und kaum vorhersehbar verlaufen. Dabei kann der Betriebswart rasch überfordert werden, wenn es gilt, die Spülorgane, die Verschlüsse und die Turbinen gleichzeitig so zu bedienen, dass weder Verklausungen durch Schwemmholz noch Geschiebeanlagerungen in der Fassung oder am Turbinenauslauf entstehen. War das Geschiebemonitoring ursprünglich nur für die Überprüfung der implementierten baulichen Abwehrmassnahmen konzipiert worden, so wurde es aufgrund der praxisnahen Daten mehr und mehr zu einem Werkzeug für die Optimierung des Betriebs im Hochwasserfall. Als vorläufiges Resultat konnte

schliesslich eine sichere Grundeinstellung resp. Programmierung von Grundablass, Stauklappen und Turbinen eingeführt werden, die dem Betreiber im Hochwasserfall eine risikoarme Beobachterposition bietet, um auf überraschende Ereignisse ohne Hektik reagieren zu können. Dabei orientiert sich diese Grundeinstellung weniger an einer Energiemaximierung während Hochwasserabflüssen als vielmehr an einer Minimierung von Risiken und Schäden.

Insgesamt präsentiert sich dem Bauherrn nun ein Kraftwerk, welches ihm trotz der sehr unvorteilhaften Anordnung der Wasserfassung auf der Kurveninnenseite des geschiebeführenden Flusses keine übermässigen Produktionsausfälle und keine häufigen Geschiebebaggerungen beschert. Die relativ kostengünstige, qualitative Geschiebetransportmessung mittels Geophonen hat sich dabei als ein überaus hilfreiches Instrument auch für die Betriebsoptimierung erwiesen.

Verdankung

Die vorliegende Untersuchung zum Geschiebemonitoring am Kraftwerk Mühlau in Bazenheid (SG) wurde vom Forschungsprogramm Wasserkraft des Bundesamtes für Energie (BfE) unterstützt. Bei der Dimensionierung des Messsystems für den Geschiebetransport und bei der Auswertung der Daten wurde durch die Eidg. Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wertvolle Unterstützung geleistet; dabei kam diese Partnerschaft zwischen Forschungsinstitution und KMU im Rahmen eines Cleantech-KTI-Projekts zustande.

Literatur

H. Scheuerlein (1984): Die Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen, Wilhelm Ernst & Sohn.

F. Schöberl (1989): Hydraulisch-technische Entwurfsprinzipien von Wasserfassungen im alpinen Wasserkraftbau, in: Die Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 41 (1989), Heft 3/4.

M. Bouvard (1992): Mobile Barrages and Intakes on sediment transporting rivers, Balkema.

F. Mtalo (1988): Geschiebeabzug aus Kanälen mit Hilfe von Wirbelröhren, Bericht Nr. 58, Versuchsanstalt Obernach, TU München.

A.P. Schmidt, G.R. Bezzola (2002): Geschiebeabzug in Kraftwerkskanälen mit Hilfe von Wirbelröhren – Fallbeispiel Kraftwerk Schiffmühle, VAW ETHZ, in «Wasser Energie Luft» 2002, Heft 11/12.

J.M. Turowski, et al. (2008): Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen – Anwendungsmöglichkeiten von Geophonmessanlagen, in «Wasser Energie Luft», 2008, Heft 1.

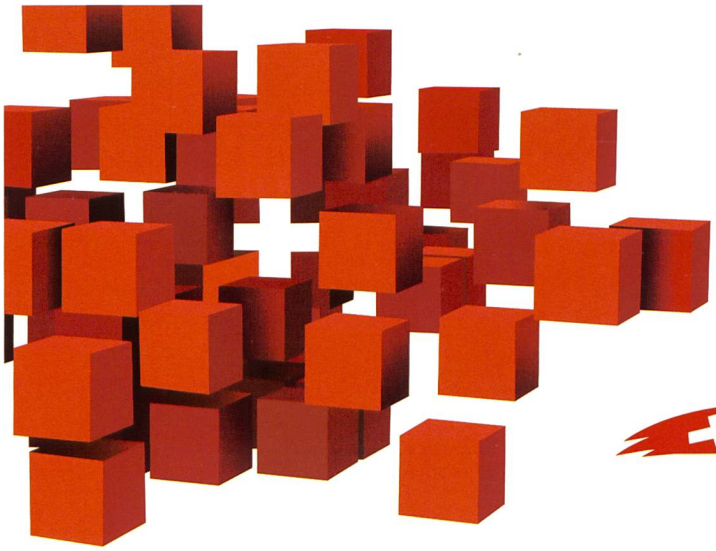
Dr. D. Rickenmann, B.W. McArdell (2007): Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors, Earth Surface Processes and Landforms, published online 12 January 2007 in Wiley InterScience.

ARGE FuThur c/o *Dr. U. Schälchli* (2005): Geschiebehaushalt Thur und Einzugsgebiet; Projekt 1: Thur–Toggenburg, Juni 2005.

Anschrift der Verfasser:

Peter Eichenberger und *Ivo Scherrer*
Entegra Wasserkraft AG, Reichsgasse 3
CH-7000 Chur
Tel. +41 81 511 11 60, www.entegra.ch
peter.eichenberger@entegra.ch
ivo.scherrer@entegra.ch

Matthias Wiget
Eturnity GmbH, Reichsgasse 3
CH-7000 Chur, Tel. +41 79 446 80 92
www.eturnity.ch
matthias.wiget@eturnity.ch



SUISSE PUBLIC
Schweizer Fachmesse für öffentliche Betriebe + Verwaltungen
Exposition suisse pour les collectivités publiques

Bern, 18.–21.6.2013
Messeplatz | Site d'exposition
www.suissepublic.ch

Ermässigtes SBB RailAway-Kombi.
Offre RailAway CFF à prix réduit.

PRO AQUA

Veranstalter/ Organisateur
BERNEXPO GROUPE

Patronat/ Patronage
Schweizerischer Städteverband / Union des villes suisses / Unione delle città svizzere
Schweizerischer Gemeindeverband / Association des Communes Suisses

SBB CFF FFS
libero