

Modellversuch zur Aktivierung des Sedimenttransports unterhalb von Flusskraftwerken

C. Sindelar, H. Knoblauch

1 Einleitung

Bei fünf Kraftwerken der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ im Bundesland Salzburg, Österreich, wurde bei der Errichtung eine Unterwasser-Eintiefung vorgenommen, die das Gefälle auf 0,05 % reduzierte. Das bei Spülungen aus dem Stauraum ausgetragene Sediment sedimentiert aufgrund des reduzierten Sohlgefälles im Unterwasserbereich (UW-Bereich). Dadurch kommt es zu massiven Einbußen in der Energieproduktion. Aus ökologischen, wasserwirtschaftlichen und ökonomischen Gründen ist es nicht erwünscht, diese Anlandungen durch Baggerungen zu entfernen. Im Allgemeinen soll die Durchgängigkeit des Sediments durch alle Anlagen der Kraftwerkskette gegeben sein. Anstatt Baggerungen soll durch konstruktive Maßnahmen der Sedimenttransport aktiviert werden. In der Laborhalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft wurden in einem Modellversuch verschiedene Maßnahmen zur Aktivierung des Sedimenttransportes untersucht. Exemplarisch für die gesamte Kraftwerkskette wurden die Untersuchungen für das Kraftwerk St. Veit durchgeführt. Die annähernd baugleichen Anlagen der Kraftwerkskette bestehen jeweils aus einem Krafthaus mit zwei horizontalen Kaplan-Rohrturbinen und einer Wehranlage mit drei Wehrfeldern mit je 10 m Breite. Das Kraftwerk St. Veit ist das zweite Kraftwerk in der Kraftwerkskette. Bei einer Ausbauwassermenge von $183 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Fallhöhe von 10 m hat es eine Engpassleistung von 16,5 MW. Das 1-jährliche Hochwasser beträgt $220 \text{ m}^3/\text{s}$, das 100-jährliche Hochwasser $770 \text{ m}^3/\text{s}$.

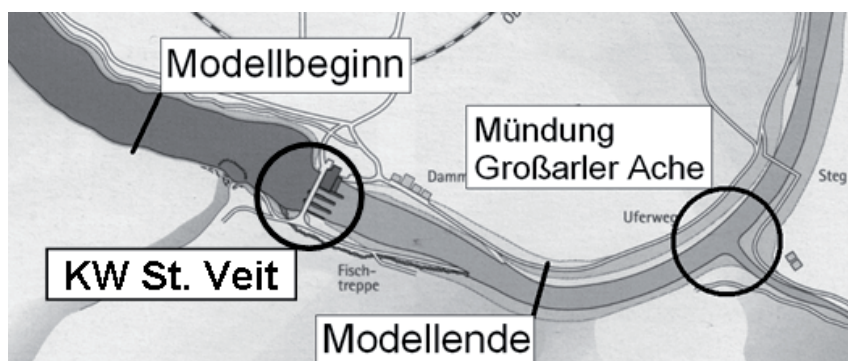


Abb. 1: Lageplan des Kraftwerks St. Veit samt Modellgrenzen

1.1 Geschieberäumungs-Projekt

Im Jänner 2007 wurden bei allen Kraftwerken der Kette im Unterwasser-Bereich Baggerungen durchgeführt. Dies wurde behördlich bewilligt, da durch die großen Anlandungen die Wasserspiegellagen so hoch angestiegen waren, dass die Hochwassersicherheit nicht mehr gegeben war. Bei den Baggerungen wurde ein Sohlgefälle von 0,15 % (statt ursprünglich 0,05 %) hergestellt. Damit sollten im Spülfall größere Sohlschubspannungen erzielt werden.

2 Modellaufbau KW St. Veit

Das nicht überhöhte Modell für das Kraftwerk St. Veit wurde im Jahre 2002 im Maßstab 1:40 in der Laborhalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz aufgebaut. Es umfasst den Oberwasserbereich auf einer Länge von ca. 250 m, die Wehranlage samt Krafthaus und den Unterwasserbereich von rund 400 m. Das Modell wurde mit fester Beton-Sohle hergestellt. Im Jänner 2007 wurde die Sohlneigung von 0,15 % laut o.a. Geschieberäumungs-Projekt im Modell eingebaut.

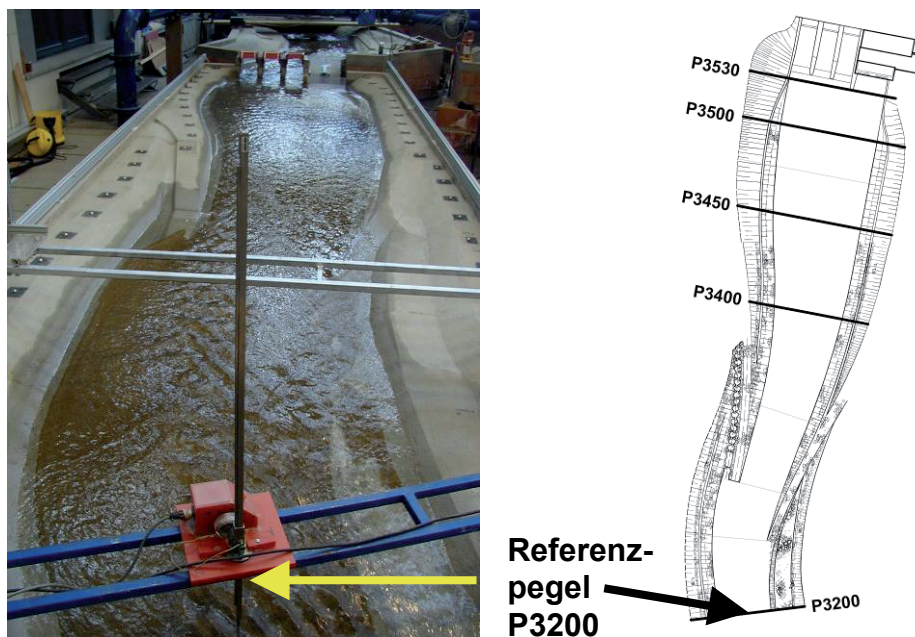


Abb. 2: Unterwasser-Bereich Modell St. Veit, Modell (Blickrichtung flussauf) und Lageplan

2.1 Modell

Die Versuche wurden gemäß dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz betrieben. Die Rauigkeiten wurden durch die Einhaltung vorgegebener Pegelschlüssel korrekt abgebildet. Die Wasserstände für den Referenzpegel im Querprofil wurden mittels einer pneumatisch betriebenen Klappe am Modellende eingestellt. Die Klappe regulierte sich automatisch auf den vorgegeben

Wasserstand am Referenzpegel, der mittels Steuerrelais mit der Klappe verbunden war. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mittels einer 3D-ADV-Sonde (Nortek, Vectrino+) durchgeführt. Diese wurden indirekt auch zur Berechnung von auftretenden Sohlschubspannungen herangezogen. Bei den Versuchen mit Geschiebezugabe wurde die verlandete Sohle fotogrammetrisch ausgewertet. Dies erlaubte eine einfache Berechnung der Volumina des im Unterwasser-Bereich angelandeten Geschiebes.

2.2 Geschiebe in Natur und Modell

Als Basis für die Wahl des geeigneten Modell-Geschiebes wurden die vom Auftraggeber bereit gestellten Sieblinien von Sedimentproben im Unterwasser-Bereich herangezogen. Aus der Abb. 3 ist ersichtlich, dass sich im Jahr 2006 eine Deckschicht gebildet hat. Durch die Geschieberäumung im Jänner 2007 wurde diese Deckschicht aufgerissen und abgetragen, die Geschiebeproben 2007 weisen keinen Hinweis auf eine Deckschichtbildung auf.

Für die Umrechnung eines Modell-Korndurchmessers d_M in den entsprechenden Natur-Korndurchmesser d_N gilt für nicht überhöhte Modelle laut Kobus (1984):

$$d_N = \frac{L_r}{\Delta\rho_r} \cdot d_M \quad [1]$$

mit

$$\Delta\rho_r = \frac{(\rho_S - \rho_W)_N}{(\rho_S - \rho_W)_M} \quad [2]$$

Dabei ist L_r der Längen- bzw. Höhenmaßstab und $\Delta\rho_r$ das Verhältnis des Dichteunterschiedes von Sediment und Wasser in der Natur $(\rho_S - \rho_W)_N$ zu jenem im Modell $(\rho_S - \rho_W)_M$.

Das Strahlgranulat ist umgerechnet auf Naturmaße das größte Modellgeschiebe. Bei den Geschiebeversuchen im Spülbetrieb (geöffnete Wehrfelder) sedimentierte das Strahlgranulat im Tosbecken und wurde von dort nicht weiter transportiert. Da dies nicht den tatsächlichen Vorgängen in der Natur entspricht, wurde das Strahlgranulat als Modellgeschiebe ausgeschieden. Der verwendete Keramiksand zeigte in den Versuchen ein realistisches Anlandungs- bzw. Transportverhalten.

Allerdings ist die Gleichung [1] nur unter Vernachlässigung der Korn-Reynolds-Ähnlichkeit (Re^* -Ähnlichkeit) gültig. Dies ist nur zulässig, wenn gewährleistet werden kann, dass $Re^* > 60$ gilt. Die folgende Tabelle zeigt, dass dies für die beiden oben erwähnten Geschiebe nicht zutrifft. Um Re^* bei vorgegebener Geometrie und fixen Strömungsbedingungen zu erhöhen, muss der

Durchmesser des Sediments erhöht werden. Daher wurde schlussendlich ein Kunststoffgranulat verwendet, das ähnlichen Natur-Korngrößen entspricht wie der Keramiksand, aber wesentlich größere Korndurchmesser (2-3 mm) hat. Es besitzt eine Rohdichte von $1,28 \text{ kg/dm}^3$.

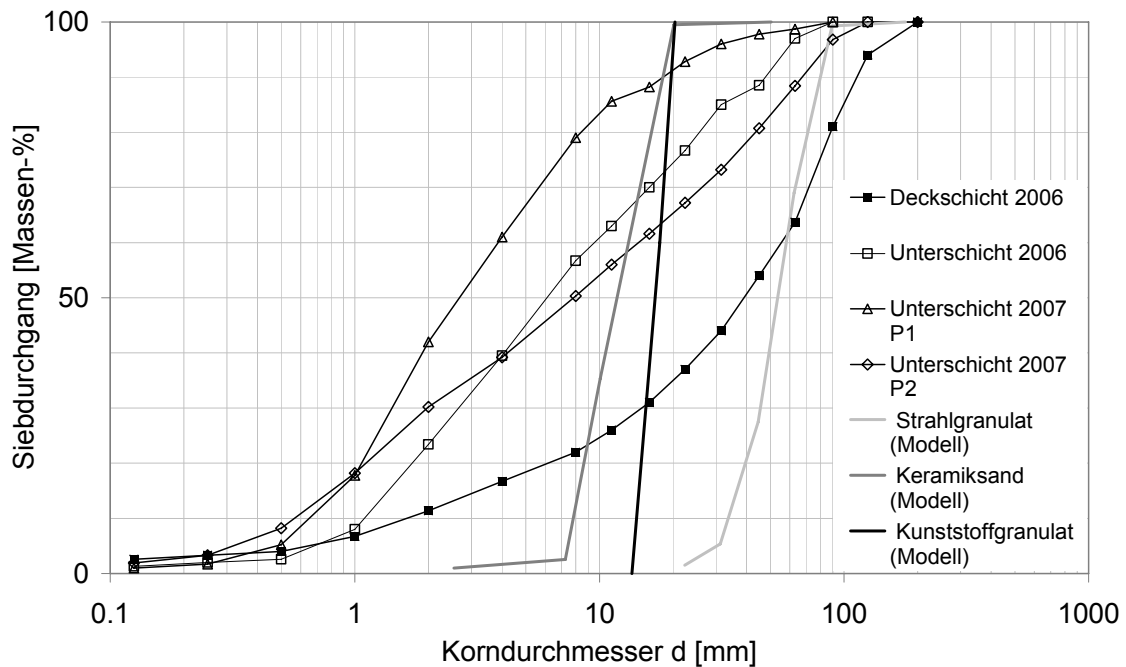


Abb. 3: Korngrößenverteilung von Natur- und Modellgeschiebe

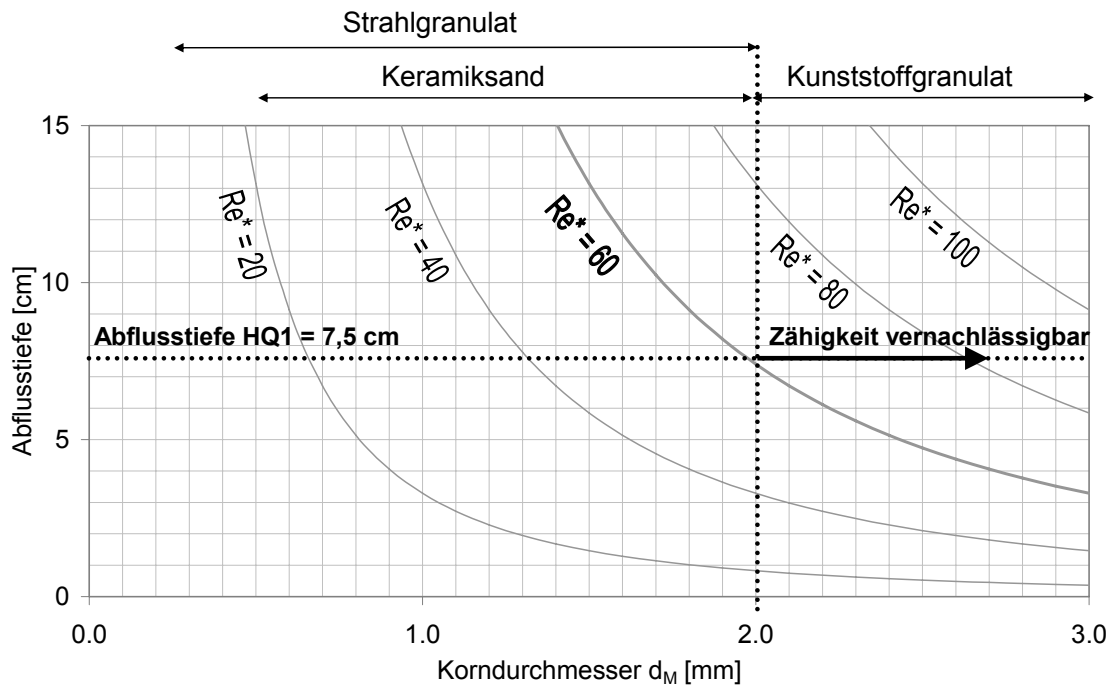


Abb. 4: Einfluss der Zähigkeit - Re^* in Abhängigkeit von Korndurchmesser und Abflusstiefe

3 Maßnahmen im Oberwasserbereich

3.1 Ausgangszustand

In den Modellversuchen zeigte sich, dass im Spülfall bei HQ1 die Zuströmung zu den Wehrfeldern im Oberwasserbereich (OW-Bereich) hydraulisch ungünstig verläuft. Kurz oberhalb der Wehrfelder kommt es zu einem gewellten Abfluss (Übergangsbereich von Schießen zu Strömen). Dadurch landet sich das Geschiebe unmittelbar vor den Wehrfeldern ab, die Strömung wird durch eine Sekundärströmung abgelenkt, so dass das Sediment fast ausschließlich über das turbinennächste Wehrfeld abgeführt wird. Dadurch verlandet der Turbinenauslauf sehr stark. Eine Luftaufnahme des Kraftwerks im Spülbetrieb belegt, dass sich dieses ungünstige Verhalten auch in der Natur zeigt.

3.2 Variante Leitwerke

Zunächst wurde versucht, mit dem Einbau von Leitwerken im OW-Bereich die Strömungssituation zu verbessern. Dies gelang zwar, denn das Geschiebe wurde mithilfe der Bühnen hauptsächlich über das mittlere Wehrfeld abgeführt. Allerdings wären der Arbeitsaufwand und die Kosten für den Einbau von Leitwerken im OW-Bereich außerordentlich groß gewesen, darüber hinaus bestünde die Gefahr, dass die Bühnen verlanden. Daher wurde nach anderen Lösungen gesucht.



Abb. 5: Wehrfelder OW-seitig: Ausgangszustand (links), Leitwerke (Mitte), geschlossenes

3.3 Wehrfeldstrategie

In einem weiteren Schritt wurde die Strömungssituation bei geschlossenem linkem Wehrfeld untersucht. Dabei zeigte sich, dass das Geschiebe nun größtenteils über das rechte turbinenfernste Wehrfeld abgeführt wird. Dadurch wird der Turbinenauslaufbereich weitestgehend von freigehalten. Für die Praxis ist der Verschluss eines Wehrfeldes nur für Durchflüsse bis HQ5 geplant. Bei höheren Abflüssen reichen die Schleppspannungen aus, um das mitgeführte

Geschiebe in ausreichendem Maß durch den UW-Bereich weiter zu transportieren.

4 Maßnahmen im Unterwasserbereich

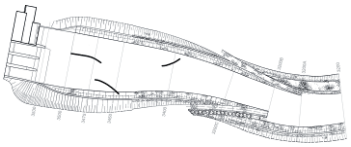
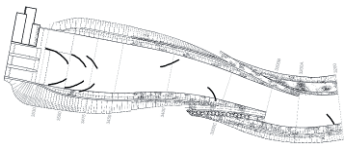
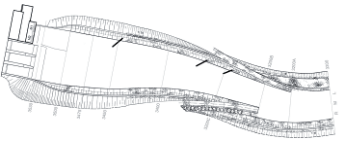
4.1 Verlängerung des Unterwasser-Trennpfeilers

Im Jahr 2002 wurde im Modellversuch eine Verlängerung des Trennpfeilers zwischen turbinennächstem Wehrfeld und Turbinenausgang im UW-Bereich zur Aktivierung des Geschiebetransports untersucht. Die Trennpfeiler-Variante ergab eine deutliche Reduktion der Anlandungen im UW-Bereich. Bei der Planung dieser Variante durch den Auftraggeber stellte sich heraus, dass der nachträgliche Einbau des Trennpfeilers an der bestehenden Anlage sehr kostspielig wäre. Daher wurde von einer Umsetzung abgesehen.

4.2 Bühnen-Varianten

Im Jahr 2006 wurde das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft erneut beauftragt, Maßnahmen zur Verbesserung des Geschiebetransports im Unterwasserbereich zu untersuchen. In dieser Versuchsserie sollten verschiedene Bühnenvarianten im UW-Bereich des Kraftwerks untersucht werden. Ideen dazu stammen von der Baubezirksleitung (BBL) Bruck/Mur, die mit dem Einbau überströmter Bühnen im UW-Bereich eines Kleinkraftwerks an der Mürz in der Steiermark (Engpassleistung ~ 500 kW, Ausbauwassermenge ~ 20 m³/s) bereits gute Erfahrungen vorweisen konnte. Die Bühnen werden in der Natur aus großen Wasserbausteinen (Durchmesser ca. 1,5-2 m) hergestellt, die etwa zur Hälfte in die Sohle eingegraben werden. Im Modell werden die Bühnen durch Stahlelemente dargestellt.

Im Rahmen der Modellversuche wurden insgesamt 15 verschiedene UW-Varianten getestet.

OW0 bzw. UW0	OW1	OW2
Unverbauter Referenzzustand im Ober- bzw. Unterwasser	Bühnen oberwasserseitig	linkes Wehrfeld geschlossen
UW3	UW4	UW17
		

Tab. 1: Auszug aus den getesteten OW- bzw. UW-Varianten inkl. verwendeter Abkürzungen

Bei den UW-Varianten UW3 und UW4 wurde durch die Anordnung der Buhnen an der abwechselnd linken und rechten Seite versucht, das Wasser in eine Pendelbewegung zu versetzen. Bei UW4 sollte durch die Anordnung der Buhnen eine Düsenwirkung erzeugt werden. Die linksufrige Buhnen-Anordnung von UW17 sollte die Hauptströmung mittig bzw. auf der rechten Seite halten.

5 Versuchsablauf und Ergebnisse

Es wurde ein 1-jährliches Hochwasser simuliert. Das ist der minimale Abfluss, bei dem eine Spülung laut behördlich genehmigter Verordnung möglich ist. Der Ab- bzw. Aufstauvorgang wurde nicht simuliert. Es wurde ein mittlerer Geschiebeaustrag aus dem Stauraum pro Stunde angenommen. Das Geschiebe wurde mittels einer vibrierenden Zugaberinne gleichmäßig über den Querschnitt verteilt am Modellbeginn zugegeben. Es war geplant, eine Hochwasserdauer von 48 h zu simulieren. Es stellte sich jedoch schon etwa zur Halbzeit ein stationärer Zustand der Sohle im Unterwasser ein. Daher ergaben sich folgende Versuchsbedingungen (Tab. 3).

Versuchsannahmen	Natur	Modell
Abfluss HQ1 konstant	220 m ³ /s	21,74 l/s
Geschiebeaustrag / h	500 m ³ /h	50 dm ³ /h
Dauer Geschiebetrieb	25,3 h	4 h
Nachspülphase über Wehrfelder ohne Geschiebezugabe	6,3 h	1 h

Tab. 2: Versuchsbedingungen

Nach dem Versuch wurde die verlandete Sohle fotografiert und mittels Fotogrammetrie die Verlandungsstrukturen ausgewertet.

Die Wahl der Oberwasser-Variante hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verlandungssituation im UW-Bereich. Ohne OW-Buhnen und mit allen drei Wehrfelder geöffnet (OW0) konnte keine untersuchte UW-Buhnenvariante den Geschiebetrieb entscheidend verbessern. Teilweise verschlechterte sich das Ergebnis durch den Einbau der Buhnen sogar (bspw. bei Variante UW4). Bei den Versuchen mit OW-Buhnen (OW1) konnte bei manchen UW-Buhnenvarianten eine minimale Verringerung der Anlandungen im Unterwasser festgestellt werden. Bei geschlossenem linkem Wehrfeld (OW2) hingegen konnte mithilfe der Buhnen die Verlandung reduziert werden. Als Lösungsansatz wurde dem Auftraggeber die UW-Buhnenvariante UW3 in Kombination mit geschlossenem linkem Wehrfeld (OW2) vorgeschlagen.

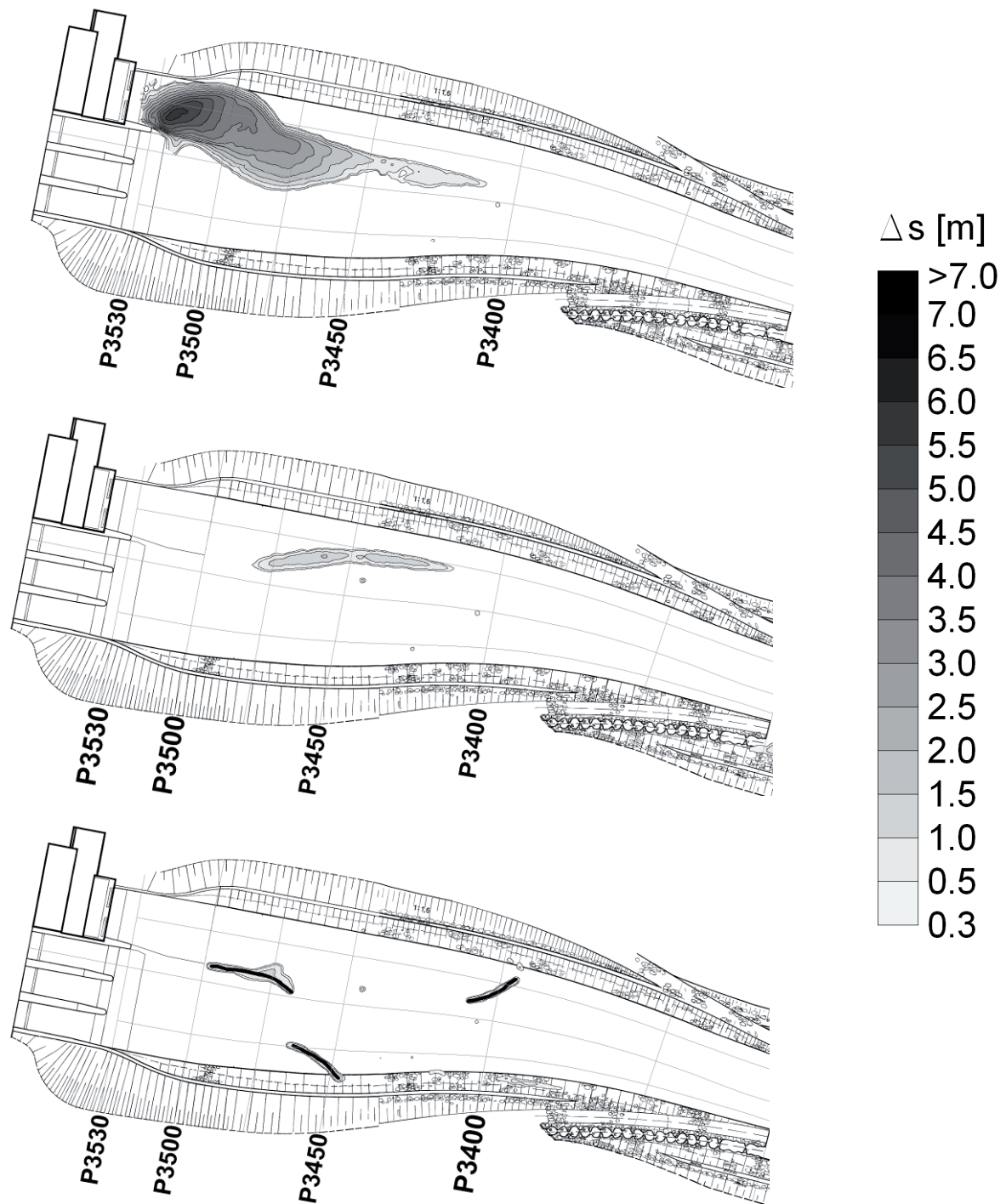


Abb. 6: Verlandung im UW: Vergleich OW0-UW0 (oben), OW2-UW0 (Mitte) und OW2-UW3 (unten, Ausführungsvorschlag)

6 Spülung im Juli 2007

Nach Abschluss der oben beschriebenen Versuche fand im Juli 2007 ein Hochwasserereignis statt, bei dem die gesamte Kraftwerkskette gespült wurde. Beim Spitzenabfluss handelte es sich in etwa um ein HQ1. Im Sinne unserer Empfehlungen blieb das linke Wehrfeld während des Spülvorgangs

geschlossen. Nach der Spülung war demnach mit einer Verlandungssituation zu rechnen, die der Modellversuchsvariante OW2-UW0 entsprach. Bei dieser Variante (siehe Abb. 6) stellte sich eine Sedimentablagerung von etwa 50m Länge, 6 m Breite und einer Höhe von ca. 1 m ein. In der Natur jedoch verlandete der gesamte UW-Bereich um bis zu 3 m. Auf der Suche nach den Ursachen für diese eklatanten Unterschiede zwischen Modell und Natur stellte sich heraus, dass ein Zubringerbach, die Großarler Ache (siehe Abb. 1), etwa 600 m flussab des Kraftwerks massiv Geschiebe in die Salzach einträgt, wodurch sich ein Rückstau bis zum Kraftwerk ergibt. Der Wasserspiegel beim Referenzprofil P3200 (siehe Abb. 2) lag aufgrund dieses Rückstaus um rund 60 cm höher als jener, der vom Auftraggeber vorgegeben war und der in den Modellversuchen eingestellt wurde. Daraufhin wurde in einer weiteren Versuchserie der Einfluss der Wasserspiegellage im Referenzprofil P3200 untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Wasserspiegellage einen entscheidenden Einfluss auf die Verlandungssituation hatte. Bei einem erhöhten Wasserspiegel von 60 cm konnte im Modell annähernd die gleiche Verlandung wie in der Natur erzielt werden. Die Buhnenvariante UW3 erwies sich für diesen hohen Wasserspiegel allerdings als nahezu wirkungslos. Vom Auftraggeber wurden daraufhin mehrere Lösungsvorschläge erarbeitet, um mithilfe von konstruktiven Maßnahmen beim Zubringerbach den Rückstau in den UW-Bereich des Kraftwerks St. Veit zu verhindern bzw. zu minimieren. Mit diesen Maßnahmen ist zu erwarten, dass der Wasserspiegel am Referenzprofil auf die ursprünglich angenommene Höhe abgesenkt werden kann. Für diesen Wasserspiegel konnte die Wirksamkeit der Buhnenvariante OW2-UW3 nachgewiesen werden.

7 Zusammenfassung

In einem Modellversuch wurden Maßnahmen zur Aktivierung des Sedimenttransportes im Unterwasser-Bereich des Flusskraftwerkes St. Veit an der Salzach untersucht. Die Verlängerung des Trennpfeilers erwies sich als wirkungsvoll, war jedoch in der Umsetzung zu teuer. Weitere Untersuchungen ergaben, dass die Zuströmung zu den Wehrfeldern oberwasserseitig ungünstig ist. In diesem Fall wird fast das gesamte ausgetragene Geschiebe über das turbinennächste Wehrfeld abgeführt, wodurch der Turbinenauslaufbereich stark verlandet. Weiters stellte sich der Einfluss der Wasserspiegellage im UW-Referenzprofil als entscheidend auf den Sedimenttransport heraus. Durch den Geschiebeeintrag eines Zubringerbaches in die Salzach 600 m flussab der Kraftwerksanlage wurde ein Rückstau erzeugt, der bei der Spülung im Juli 2007 zu großen Anlandungen führte. Durch konstruktive Maßnahmen im Bereich des Zubringerbaches soll der Rückstau in den UW-Bereich des Kraftwerks

verhindert werden. Unter dieser Voraussetzung führt das Geschlossen-Halten des turbinennächsten Wehrfeldes in Kombination mit einer überströmten Buhnenvariante im UW-Bereich dazu, dass ein Großteil des Sediments im Spülfall weiter transportiert werden kann.

Referenzen

Friedrich, J. (2008): Naturmessungen über die Funktionsweise von Buhnen an der Mürz. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, Graz.

Geisler, T. (2007): Optimierung der Geschiebetrift unterhalb von Flusskraftwerken. Bericht zum gleichlautenden Forschungsprojekt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, Graz.

Hackl, R. (2008): Glasgerinne-Grundlagenversuch über die Funktionsweise von Buhnen an der Mürz. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, Graz.

Kobus, H. (1984): Wasserbauliches Versuchswesen, DVWK Schriften, 39, 49 - 63, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

Mulley, M. (2007): Buhnen zur Verbesserung des Geschiebetransports bei Flusskraftwerken. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, Graz.

Wolf, K. (2008): Entwicklung von Buhnen und Leitwerken zur Aufrechterhaltung des Geschiebetransports. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz, Graz.

Adresse der Autoren

Mag. DI Christine Sindelar
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
TU Graz
Stremayrgasse 10 / II
A-8010 Graz
E-mail: christine.sindelar@tugraz.at



DI Dr. Helmut Knoblauch
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
TU Graz
Stremayrgasse 10 / II
A-8010 Graz
E-mail: helmut.knoblauch@tugraz.at

