

EINLEITUNG

Im Rahmen der Dritten Rhonekorrektur des Flussabschnitts oberhalb des Genfersees erhielt das Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) den Auftrag, mögliche Hochwasserschutzmassnahmen für einen Teilabschnitt der Rhone in physikalischen Modellversuchen zu prüfen.

Die Gesamtlänge des nachgebildeten Abschnitts der Rhone beträgt ca. 2.3 km, was mit einem Modellmassstab von 1:50 im Modell einer Länge von 50 m entspricht. Der Abschnitt reicht von der Vispamündung (km 109.200) bis zur heutigen Schwelle Giblält (km 106.900). Auf der rechten Flussseite mündet ein weiterer Zufluss, der Baltschiederbach, in die Rhone (Abb. 1 und 2).

Die Ziele dieser Untersuchungen bestanden zum einen in der Ausarbeitung notwendiger Massnahmen für den Hochwasserschutz im genannten Abschnitt. Zum anderen galt es, Lösungsvorschläge zu erarbeiten, die den wesentlichen Vorgaben der Dritten Rhonekorrektur (Sicherheit, Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft) nachkamen.



Abb. 1: Luftbild des gewählten Modellperimeters für den Rhoneabschnitt bei Visp

Fig. 1: Aerial view of the models perimeter of the Rhone River section at Visp



Abb. 2: Blick flussabwärts von der Vispamündung in den oberen Teil des Projektabschnitts

Fig. 2: Downstream view from the confluence of the Vispa River into the upper model section

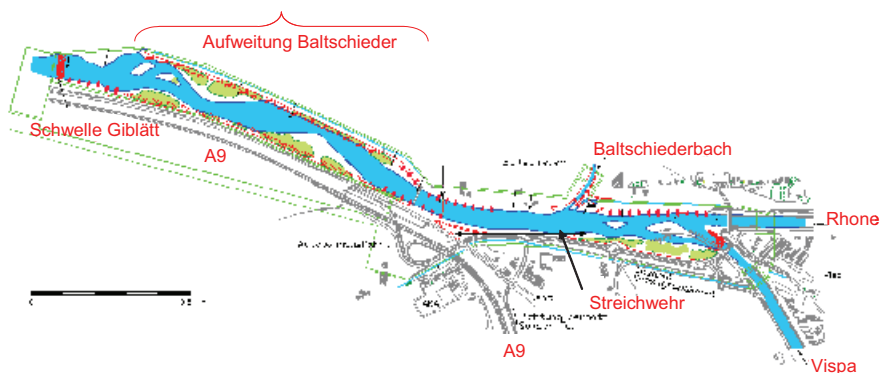


Abb. 3: Grenzen des physikalischen Modells der Rhone bei Visp (Modellmassstab 1:50)

Fig. 3: Boundaries of the physical model of the Rhone River at Visp (model scale 1:50)



Abb. 4: Physikalisches Modell im Bau
Fig. 4: Physical model under construction

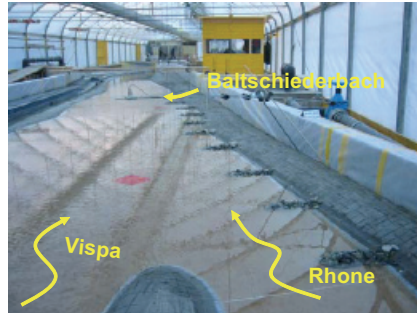


Abb. 5: Physikalisches Modell des projektierten Ausbaus mit Blick flussabwärts
Fig. 5: View downstream on the physical model as preliminarily designed

EXPERIMENTELLES VORGEHEN

Die durchgeführten Modellversuche können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Flussmorphologie
- Ufererosionsmassnahmen
- Hochwasserschutz
- Restrisikomanagement
- Sedimenthaushalt
- Schwall und Sunk
- Verbesserungen hinsichtlich Umwelt
- Vegetation

Um instationäre Abflussbedingungen zu simulieren, wurden Hochwasserereignisse nach deren beobachteten Ganglinien in Rhone und Vispa modelliert. Die Experimente wurden mit einer beweglichen Sohle und mit einer Sedimentzufuhrmenge je nach Abflussmenge durchgeführt.

Mehrere aufeinander folgende Versuche mit einer sukzessiven Erhöhung der Abflussmengen erlaubten hinsichtlich technischer, qualitativer und quantitativer Parameter eine schrittweise Verbesserung der anfänglichen Flussgestaltung. Die Baukosten für den Hochwasserschutz konnten auf diese Weise ebenfalls optimiert werden.

Im Weiteren wird auf die drei folgenden Aspekte detaillierter eingegangen: Flussmorphologie, Ufererosionsmassnahmen, Hochwasserschutz und Restrisikomanagement, und Vegetation.

RESULTATE DER PHYSIKALISCHEN MODELLVERSUCHE

Flussmorphologie

Die physikalischen Modellierungen boten die Gelegenheit, die morphologische Entwicklung des Flussbettes zu untersuchen, welche sich aufgrund der geplanten Aufweitungen ergab (Abb. 6 und 7). In Abbildung 7 ist eine Flussbetherhöhung sichtbar, welche sich aus zwei Gründen ergeben hat: die Randbedingung am unteren Modellrand entspricht nicht derjenigen, welche den numerischen Berechnungen zu Grunde lagen. Der Unterschied der beiden Randbedingungen ist vor allem bei den kleinen und mittleren Abflüssen (bis $Q_{\text{Rhone}} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$) entscheidend. Die Sedimentzufuhr in Abhängigkeit des Abflusses wurde nach dem ersten

Versuch um den Faktor 1.5 vergrößert. Die "korrekte" Sedimentmenge ist nur schwer abzuschätzen.

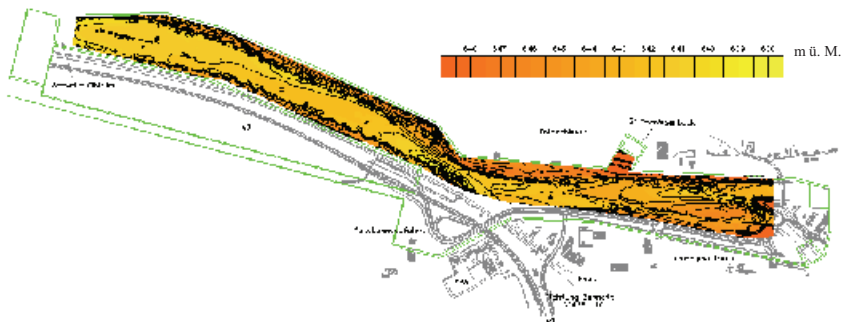


Abb. 6: Morphologische Entwicklung des Flussbettes nach einer Flussaufweitung und nach einem 5-jährlichen Hochwasser. Absolute Skala in m ü. M.

Fig. 6: Morphological development of the river bed after the widening and after a 5-year-flood. Absolute scale in m a.s.l.

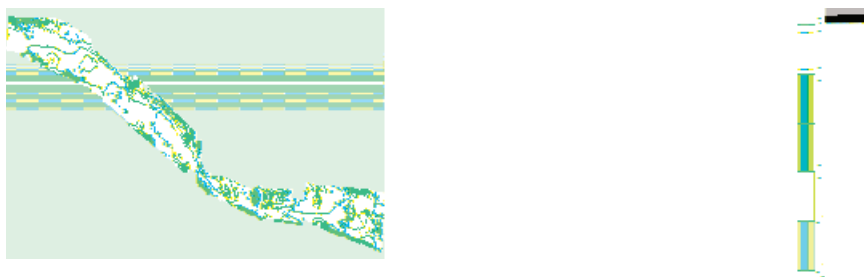


Abb. 7: Morphologische Entwicklung des Flussbettes nach einer Flussaufweitung und nach einem 10-jährlichen Hochwasser im selben Ausschnitt wie in Abbildung 6. Terraintotendifferenzen in Meter im Vergleich zum berechneten Zustand nach errungenem Gleichgewicht nach erfolgter Aufweitung.

Fig. 7: Morphological development of the river bed after widening and after a 10-year flood in the same section as in Fig. 6. Differences of the terrain elevation in meters compared with a numerical long time simulation after the river widening

Die hydraulischen Versuche mit eher geringen Abflussmengen liessen die Entstehung von mehreren Zonen mit hohem Vegetationsentwicklungspotential beobachten, welche durch die Auflandungen zustande gekommen waren. Bei morphogenen Ereignissen mit Abflussmengen in der Größenordnung von 2- bis 5-jährigen Hochwasserereignissen wurde die Entstehung von alternierenden Sandbänken erkennbar (Abb. 8 rechts), welche zu einer Verbesserung der morphologischen Dynamik beitragen. Diese und die bei den Leitbauwerken vorhandenen Zonen mit geringen Fließgeschwindigkeiten bieten die Grundlage für eine günstige Entwicklung der biologischen Vielfalt.

Ufererosion

In den Modellversuchen wurde auch ein grosses Augenmerk auf die Ufererosion gerichtet. In der Aufweitung Baltschieder (Jäggi et al., 2004) wurden dreidimensionale flussabwärtsgerichtete Leitbauwerke eingebaut und deren Einfluss auf die Flussmorphologie und die Ufer untersucht (Abb. 8). Es konnten alternierende Sandbänke beobachtet werden. Die Ufer waren gut geschützt und die Bauwerke wurden kaum angegriffen. Im Verlauf der Modellversuche konnte die Anzahl der Leitbauwerke ohne Schaden nach und nach verringert werden, wodurch nun die Baukosten gesenkt werden können.



Abb. 8: Links: Blick flussaufwärts auf die Leitbauwerke in der Aufweitung Baltschieder. Rechts: Aufweitung Baltschieder nach einem 10-jährigen Hochwasserereignis mit Leitbauwerken als Uferschutz auf beiden Seiten. Dynamische Flussgestaltung mit alternierenden Sandbänken

Fig. 8: Left: Downstream view on the groins in the Baltschieder river widening. Right: Baltschieder widening with groins after a 10-year flood. Dynamic bed morphology with alternate banks

Hochwasserschutz und Restrisikomanagement

Die Ufer der Rhone werden für den reibungslosen Abfluss eines Jahrhunderthochwassers dimensioniert, i.e. die Kapazität der Rhone wird im Abschnitt Visp-Baltschieder auf $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt. Sobald diese Zielabflussmenge überschritten wird, wird die zusätzliche Wassermenge punktuell kontrolliert entlastet. In der sauberen Ausführung dieser Entlastung besteht das Restrisikomanagement. Ein Streichwehr ist Bestandteil der technischen Massnahmen. Das seitliche Überströmen erlaubt die Überlast kontrolliert über die Dämme der Rhone in eine eigens dafür vorgesehene Überflutzungszone zu entlasten. Dazu fliesst das Wasser vorerst in einen Autobahnzubringer, welcher im Ereignisfall für den Verkehr gesperrt wird. Diese Strasse unterquert die Brücken der Autobahn und der NEAT und sinkt dazu unterhalb des gewachsenen Terrains. Nach der Gegensteigung liegt in der Autobahnzufahrtsschleife eine Bresche vor, welche das Wasser gezielt auf Landwirtschaftsland führt und von dort, infolge des Umweges mit Verzögerung und erst nach Verstreichen der Hochwasserspitze, zurück in die Rhone. Das Streichwehr ist teilweise fix und teilweise mit Kippelementen versehen, welche bei der Wassermenge eines Jahrhunderthochwassers kippen und eine Bresche freilegen. Die Effizienz dieser technischen Massnahme wurde in den Versuchen getestet und unter den Bedingungen eines Extremhochwasserereignisses optimiert. Im Modellversuch wurden die Kippelemente durch Elemente ersetzt, welche im Falle einer Beaufschlagung (sobald die Wasserhöhe die Oberkante des Elementes erreicht) an einem Faden in die Höhe

gezogen wurden (Abb. 12). Es konnte gezeigt werden, dass die Elemente derart angelegt werden müssen, dass sie von flussabwärts nach flussaufwärts beaufschlagt werden, um in folge einer Staukurve hervorgebrachten Dominoeffekt auf die benachbarten Elemente flussabwärts zu verhindern (Abb. 13). Es wurde beobachtet, dass die Terraintote jenseits des Streichwehres einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der Entlastung hat. Ohne zusätzliches Abteufen des Terrains wird der Überfall eingestaut, das Wasser fließt teils sofort zurück in die Rhone und das Streichwehr ist nicht funktionstüchtig. Hohes Interesse galt der entlasteten Abflussmenge und den Sedimenttransportbedingungen flussabwärts des Streichwehres. In Funktion der Zeit weist die entlastete Abflussmenge ein hysteresisches Verhalten auf: bei steigendem Rhoneabfluss ist das Verhältnis Rhoneabfluss zu Entlastungsmenge linear, bei sinkendem Abfluss polynomisch, was durch die irreversible Öffnung der Kippelemente erklärt werden kann (Abb. 9). Die Entlastung springt vor Erreichen des Höhepunktes der Jahrhunderthochwasserganglinie an (bei $Q_{\text{Rhone}} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ statt erst bei $Q_{\text{Rhone}} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) und hält beim Hochwasserrückgang länger an (bis $Q_{\text{Rhone}} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$).

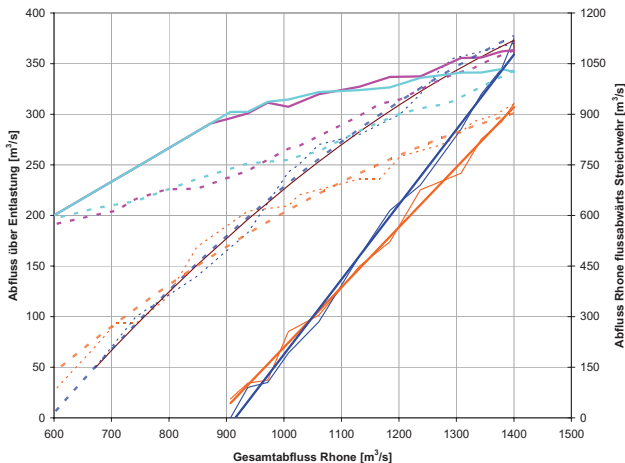


Abb. 9: Hysterese: Bei steigendem Rhoneabfluss ist das Verhältnis Rhoneabfluss zu Entlastungsmenge linear, bei sinkendem Abfluss polynomisch. Orange: Handmessungen der Abflussmengen über Streichwehr, pink: Handmessungen verbleibender Abfluss in der Rhone flussabwärts des Streichwehres, dunkelblau: Messungen der Abflussmengen mittels UVP über Streichwehr, hellblau: Messungen mittels UVP verbleibender Abfluss in der Rhone flussabwärts des Streichwehres

Fig. 9: Hysteresis: When flow is increasing the relationship between the flow in the Rhone River and the overtopped flow is linear, when flow is decreasing, the relationship is polynomial. Orange: measures of deviated discharge effectuated by hand, dark blue: measures of deviated discharge done by UVP, pink: measures of discharge downstream weir effectuated by hand, light blue: measures of discharge downstream weir performed by UVP.

Die entlastete Abflussmenge war im Versuch grösser als in der Projektphase angenommen. In den Modellversuchen mit Ganglinien von Extremhochwassermengen ($\text{EHQ} = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$) wurde beobachtet, dass die Entlastung bereits vor Erreichen der Jahrhunderthochwasserabflussmenge ($\text{HQ}_{100} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) ansprang. Dieses Phänomen kann u. a. mit der reduzierten Geschiebetransportkapazität und damit verbundenen Sediment-ablagerungen im Bereich der Entlastung erklärt werden (Rosier, 2007 und Rosier et al., 2007). Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die Ganglinien, welche mittels einer Maxwell-Annäherung vereinfacht

und auf ein EQH extrapoliert wurden, die Gesamtwassermenge der beobachteten Hochwasserereignisse wahrscheinlich um ca. 25% überschätzen. Die entlasteten Wassermengen wurden mittels Wasserhöhenmessung vor einem Überfall eruiert. Diese Messungen wurden nicht geeicht, deshalb besteht eine Unsicherheit bezüglich des Überfallkoeffizienten. Die Kippelemente waren im Modell breiter als gemäss Modellmassstab und eckig, während sie für das Bauprojekt mit einer runden Überfallkante geplant wurden. Im Modell wurde die entlastete Wassermenge dementsprechend unterschätzt. Aufgrund des Modelleffekts der Wasseroberflächenanspannung wurden im Modell die Kippelemente später entfernt als sie in natura kippen würden. Falls die Kippelemente beim Rückgang des Hochwassers wieder aufgestellt, resp. die Breschen wieder verschlossen werden könnten, könnte das Verhältnis des Abflusses in der Rhone zum entlasteten Abfluss auch beim Hochwasserrückgang linear angenommen werden. Das entlastete Volumen könnte dadurch auf ca. 80 % reduziert werden (Abb. 10).

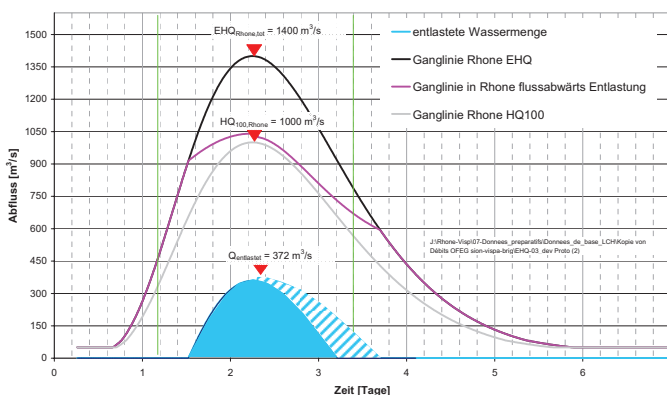


Abb. 10: Ganglinien des EQH und HQ100 in der Rhone, blau: entlastete Wassermenge bei EQH, blau/weiss schraffiert: entlastete Menge falls Kippelemente beim Hochwasserrückgang wieder aufgestellt würden. Pink: Ganglinie flussabwärts der Entlastung

Fig. 10: Hydrograph of EQH and HQ100 in the River Rhone, blue: overtopped water volume at an EQH, blue/white hatched: overtopped water volume in case that the tilting elements could be re-established after having reached the flood peak, pink: hydrograph downstream the side weir

Die Modellversuche haben gezeigt, dass eine Buhne unmittelbar flussabwärts des Streichwehrs sich günstig auf die Entlastung auswirkt, da das Wasser im strömenden Abfluss daran rückgestaut und der Wasserspiegel lokal angehoben wird. Diese Buhne verhindert auch eine starke Erosion an derselben Stelle unmittelbar flussabwärts des Streichwehrs, die ohne diese bauliche Massnahme beobachtet wurde. Es traten kaum Sedimente über die Entlastungskante, so dass flussabwärts des Streichwehrs dieselbe Sedimentmenge vorhanden ist, wie die höhere Abflussmenge von flussaufwärts bis dahin transportiert hatte. Die im unteren Flussabschnitt aufgrund der Entlastung verringerte Transportkapazität hat jedoch in der Aufweitung Balthsieder keine sichtbar höheren Ablagerungen zur Folge.

Vegetation

Die Verbreiterung der Rhone und die Entstehung von alternierenden Sandbänken begünstigt die Entwicklung einer Flussufervegetation, welche die hydraulische Kapazität beeinträchtigen kann. Der Einfluss der Vegetation wurde im hydraulischen Modell simuliert, damit Anwei-

sungen bezüglich des notwendigen Unterhaltes hinsichtlich der erforderlichen Hochwassersicherheit definiert werden konnten. Der Einfluss der Vegetation auf den Transport von Geschwemmel wurde ebenfalls untersucht.

Nach einer Versuchsserie mit Flussbett prägenden Abflussmengen in der Grössenordnung von 2, 5 und 10 Jahren Wiederkehrperiode, wurde ein 1-jährliches Hochwasser simuliert, um die Ablagerungszonen, welche über den Wasserspiegel hinaus ragen, ausfindig zu machen. In diesen Zonen, in welchen sich die Flussufervegetation besonders gut entwickelt, wurden anschliessend, gemäss der voraussichtlichen Vegetationsentwicklung, welche für das Projekt der Dritten Rhonekorrektur angenommen wurde, Kresse angesät und Tannenknospen angepflanzt. Nachdem die Vegetation Fuss gefasst hatte und die Sprossen kräftig waren, wurden Hochwasserversuche durchgeführt, um den Einfluss der Vegetation auf die Strömung und auf das Geschwemmel sowie auf den Fortbestand der begrüneten Bereiche zu beobachten (Abb. 11).

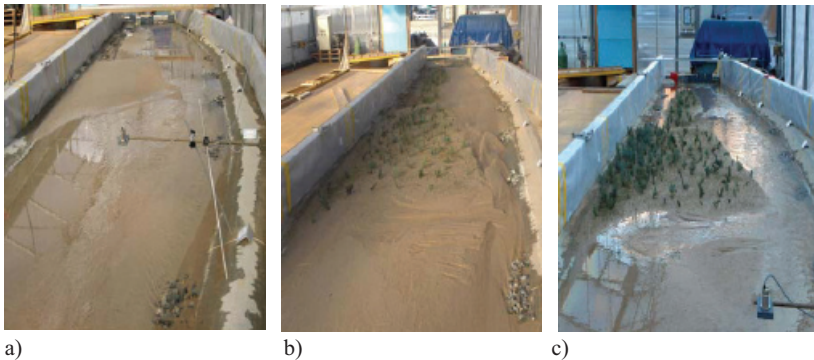


Abb. 11: Ablagerungszone am unteren Ende der im hydraulischen Modell simulierten Strecke a) nach der morphologischen Entwicklungsphase, b) nach der Saat und dem Einpflanzen der Setzlinge, c) in fortgeschrittenem Begrünungsstadium.

Fig.11: Sedimentation zone at the downstream end of the hydraulic model a) after the morphologic evolution phase, b) after the cress seeding and the fir tree buds planting, c) after vegetation evolution.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vielseitigen physikalischen Modellversuche lassen ein neues Untersuchungskonzept für die Auswertung und Verbesserung eines komplexen Flusskorrektionsprojekts erkennen. Hinzu kommt, dass die Veranschaulichung des Projekts mittels Modellversuchen eine effiziente Kommunikationsplattform zwischen Ingenieuren, Umweltschützern, Politikern und Bevölkerung darbietet und die Akzeptanz eines solch komplexen Projekts fördert.

Dank der Modellversuche konnten Kostenersparnisse in der Projektausführung erreicht werden und die Projektierenden auf bisher unterschätzte oder unerkannte Gefahren (entlastete Wassermengen bei Jahrhunderthochwasserereignissen, eingestauter Überfall bei Entlastung) aufmerksam gemacht werden. Es konnten geometrische Angaben verfeinert werden, wie zum Beispiel diejenigen der Hochwasserentlastung. Die morphologische Entwicklung in einem aufgeweiteten Bereich (Aufweitung Baltschieder) kann abgeschätzt werden und geometrische Formen können den Gegebenheiten (Buhnen, Mündungssporn Vispa-Rhone) angepasst und

strömungstechnisch optimiert werden (s. auch Bourgeois, 2006). Hydraulische Modellversuche lassen schnell und einfach die Einflüsse von Projektänderungen abschätzen und lassen Modellierungen von komplexen Flussläufen zu. Die Messresultate können auf einfache Weise in den Massstab der Natur übertragen werden. Die heutigen Berechnungsmethoden sind zwar weit fortgeschritten, können jedoch bei einem solch komplexen Projekt noch nicht zweifellos Schritt halten. Sie dienen aber dazu erste Abschätzungen des Fliessverhaltens zu erhalten, aufgrund jener das Modell auch aufgebaut wurde.

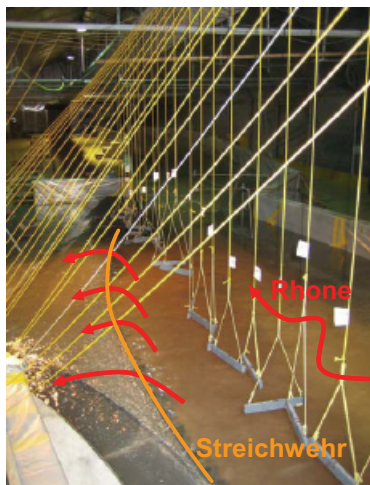


Abb. 12: "Gekippte" (hochgezogene) Kippelemente an Faden. Beaufschlagtes Streichwehr

Fig. 12: "Tilted" (lifted) elements fixed at wires. Charged side weir

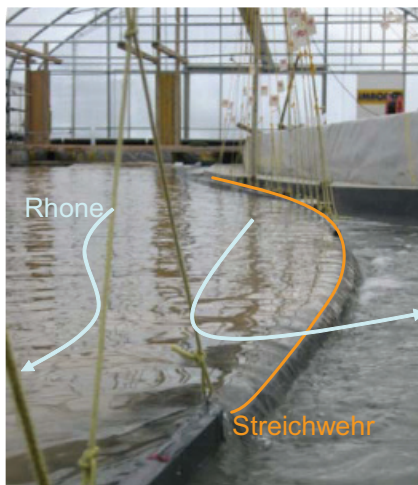


Abb. 13: Staukurve auf benachbartes Kippelemente im Falle einer Streichwehrbeaufschlagung von flussaufwärts nach flussabwärts

Fig. 13: Backwater curve on the next element downstream in case of a side weir admission in downward direction

LITERATUR

- Jäggi, M., Nigg, U., Teyssere Ph. (2004): "Die Sedimentkatastrophe von Baltschieder", Internationales Symposium Interpraevent 2004 – Riva – Trient
- Bourgeois, M. (2006): "Accroissement de la valeur naturelle de la vallée du Rhône par un raccordement optimal des affluents au Rhône", Travail de Master EPFL - LCH
- Rosier, B. (2007): "Interaction of a side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel", Dissertation 3872, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz
- Rosier, B., Boillat, J.-L., Schleiss, A. (2007): "Modell zur Berücksichtigung morphologischer Unsicherheiten bei der Bemessung einer seitlichen Notentlastung", Dresdner Wasserkolloquium – Fünf Jahre nach der Flut, Wasserbauliche Mitteilungen, Nr. 35, Technische Universität Dresden, pp. 416 – 424