

Communication 33

Symposium

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Ausschöpfung von Synergien
im Rahmen der 3. Rhonekorrektur

Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

*Utilisation des synergies dans le cadre
de la 3^{ème} correction du Rhône*

Lausanne, 7. November 2007

- N° 6 1998 N. Beyer Portner
Erosion des bassins versants alpins suisse par ruissellement de surface
- N° 7 1998 G. De Cesare
Alluvionnement des retenues par courants de turbidité
- N° 8 1998 J. Dubois
Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface
- N° 9 2000 J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System - Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre
- N° 10 2002 J. Dubois, M. Pirotton
Génération et transfert des crues extrêmes - Le logiciel Faitou
- N° 11 2002 A. Lavelli, G. De Cesare, J.-L. Boillat
Modélisation des courants de turbidité dans le bassin Nord du Lac de Lugano
- N° 12 2002 P. de Almeida Manso
Stability of linings by concrete elements for surface protection of overflow earthfill dams
- N° 13 2002 E. Bollaert
Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact
- N° 14 2003 D. S. Hersberger
Wall roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel bed
- N° 15 2003 Ch. Oehy
Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents
- N° 16 2004 J.-L. Boillat, P. de Souza
Hydraulic System - Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge
- N° 17 2004 Cycle postgrade en aménagements hydrauliques
Collection des articles des travaux de diplôme postgrade
- N° 18 2004 S. Emami
Erosion protection downstream of diversion tunnels using concrete prisms - Design criteria based on a systematic physical model study
- N° 19 2004 Ph. Chèvre
Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe
- N° 20 2004 S. André
High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Vorwort

Im Rahmen eines ökologischen, umweltgerechten Hochwasserschutzes ist es heute das Bestreben aller Akteure, flussbauliche Projekte auf eine ganzheitliche und nachhaltige Basis zu stellen. Dies bedeutet, dass flussbauliche Massnahmen nicht nur im Dienste des Hochwasserschutzes, sondern auch zum Nutzen der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu entwerfen und realisieren sind. Um bei der Planung tragfähige Projekte zu erreichen und die Akzeptanz der Hochwasserschutzmassnahmen zu verbessern, müssen neben der Mitwirkung der Betroffenen auch sämtliche Synergien ausgenutzt werden.

Der Handlungsbedarf oder der Entscheid über das notwendige Ausmass der Massnahmenplanung muss insbesondere neben den Hochwasserschutzdefiziten auch die ökologischen Defizite eines Gewässers im Sinne einer gesamtheitlichen Sichtweise berücksichtigen.

In verschiedenen Forschungsprojekten im Rahmen des Rhone-Thur-Projektes wurden wissenschaftliche Grundlagen erarbeitet, welche das Bestreben dieser gesamtheitlichen Sichtweise unterstützten und mit praktischen Empfehlungen erleichtern. Das Symposium vom 7. November 2007 in Lausanne vermittelte die Resultate der zu diesem Thema an der EPFL erarbeiteten Forschungsprojekte. Sie wurden ergänzt durch weitere Beiträge der Partner des Rhone-Thur-Projektes. Am Schluss der Tagung wurde ein Ausblick auf das Nachfolgeprojekt "Integrales Flussgebietsmanagement" gegeben.

Wir danken allen Autoren und Referenten für die interessanten Beiträge.

Prof. Dr. Anton Schleiss

Dr. Jean-Louis Boillat

Avant-propos

Dans la perspective d'une protection contre les crues à caractère écologique et respectueux de l'environnement, les acteurs concernés par les aménagements de cours d'eau doivent adopter une approche globale et respecter le concept de développement durable. Cela signifie que les mesures d'aménagement ne doivent pas exclusivement satisfaire les contraintes de la protection contre les crues mais également les besoins de l'environnement, de la société et de l'économie. Afin de développer des projets soutenables et d'améliorer l'acceptation des mesures de protection contre les crues, une synergie globale doit être développée en collaboration avec les milieux concernés.

Les besoins d'intervention ou les décisions sur l'importance des mesures à prendre doivent considérer, non seulement le déficit de protection mais également le déficit écologique du cours d'eau, par une approche globale.

A travers différents projets de recherche, développés dans le cadre du projet Rhône-Thur, des bases scientifiques ont été établies pour renforcer le concept de l'approche globale et faciliter son application par des recommandations pratiques. Le symposium du 7 novembre 2007 à Lausanne avait pour objectif de communiquer les résultats obtenus à l'EPFL dans ce contexte. Ce transfert de connaissances a été complété par la contribution des autres partenaires du projet Rhône-Thur. Finalement, un aperçu des développements prévus dans le cadre du projet "Gestion intégrale de l'espace fluvial" a été donné lors du symposium.

Nous remercions tous les auteurs et conférenciers pour leurs contributions intéressantes.

Prof. Dr. Anton Schleiss

Dr. Jean-Louis Boillat

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Table des Matières / Inhaltsverzeichnis

Session 1 : Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la réduction de pointes de crues, du marnage et de la sédimentation	5
<i>Président de session : Jean-Pierre Jordan, BAFU, Gefahrenprävention</i>	
<hr/>	
Berücksichtigung von morphologischen Prozessen bei der Bemessung einer seitlichen Notentlastung	7
<i>Burkhard Rosier, Jean-Louis Boillat und Anton Schleiss</i>	
Einfluss von grossmasstäblichen Uferrauhigkeiten und Buchten auf Schwallwellen Flüssen infolge Kraftwerksbetrieb	19
<i>Tobias Meile, Jean-Louis Boillat und Anton Schleiss</i>	
Influence of shallow reservoirs geometry on the sedimentation process by suspended load	35
<i>Sameh Kantoush, Jean-Louis Boillat, Erik Bollaert and Anton Schleiss</i>	
Session 2 : Ökologische, sozioökonomische und flussbauliche Prognosemodelle	53
<i>Président de session : Dominique Bérod, SRCE Valais</i>	
<hr/>	
Nutzung wissenschaftlicher Prognosen zur gesellschaftlichen Entscheidungsfindung	55
<i>Peter Reichert</i>	
La participation: un outil de prise en compte de la complexité sociale dans l'aménagement des cours d'eau ?	57
<i>Olivier Ejderyan</i>	
Sohlenentwicklung in einer Flussaufweitung beim Durchgang einer Hochwasserwelle – Vergleich zwischen Messung und numerischer Modellierung	67
<i>Roland Fäh, Renata Müller, Patric Rousselot und David Vetsch</i>	

Session 3 : Synergies possibles pour des aménagements hydrauliques à buts multiples	79
Président de session : Tony Arborino, SRCE Valais Projet R3	
<hr/>	
Aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples : résolution du marnage artificiel et bénéfices écologiques, énergétiques et sociaux	81
<i>Philippe Heller et Anton Schleiss</i>	
Réponse écologique d'un aménagement hydraulique à buts multiples, basée sur la richesse prédite des macros-invertébrés et des valeurs d'habitat de poissons	99
<i>Marc Pellaud et Rodolphe Schlaepfer</i>	
Objectifs paysagers d'un aménagement hydraulique à buts multiples	109
<i>Thierry de Pourtalès</i>	
Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz – Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement »	125
<i>Anton Schleiss und Armin Peter</i>	

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Session 1

Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la réduction de pointes de crues, du marnage et de la sédimentation

-

Flussbauliche Massnahmen zur Verminderung der Hochwasserspitzen, der Schwall und Sunkerscheinungen sowie der Absetzung von Feinsedimenten

Président de session :

Jean-Pierre Jordan, BAFU, Gefahrenprävention

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Berücksichtigung von morphologischen Prozessen bei der Bemessung einer seitlichen Notentlastung an Flüssen

Burkhard Rosier, Jean-Louis Boillat und Anton Schleiss

Zusammenfassung

Die gezielte Überflutung von Hochwasserrückhalteräumen mittels seitlicher Entlastungsbauwerke stellt ein effektives Konzept zur Gefahrenabwehr im Hochwasserfall dar. Der reduzierte Durchfluss im Hauptgewässer bewirkt eine Verringerung der Geschiebetransportkapazität, was zu lokalen Sedimentablagerungen im Bereich der Entlastung führen kann. Diese Wechselwirkung zwischen Strömung und Geschiebetransport beeinflusst die Trenncharakteristik des Entlastungsbauwerkes im Sinne eines unkontrollierten Anstiegs der seitlichen Überfallintensität.

Bei heute gängigen Bemessungskonzepten bleibt der Einfluss der Sohlenmorphologie in der Regel weitgehend unberücksichtigt. Basierend auf systematischen physikalischen Modellversuchen ist ein eindimensionales empirisches Modell zur Beschreibung der Form des lokalen Sedimentdepots in Längsrichtung entwickelt worden. Zur raschen überschlägigen Abschätzung der Interaktion Entlastung – Geschiebetransport wird überdies ein Ansatz zur direkten Bestimmung des Entlastungsabflusses vorgestellt. Für allgemeingültige Anwendungen in der Ingenieurspraxis werden alle Modelleingangsparameter in dimensionsloser Form dargestellt. Abschließend wird die Anwendung des Bemessungskonzeptes an einem konkreten Fallbeispiel illustriert.

Abstract

Side weirs and overflow dams are free overflow regulation and diversion structures commonly encountered in flood protection engineering. The lateral loss of water is reducing the bed-load transport capacity in the main-channel leading to local sediment deposition near the side overflow. As a consequence the design discharge to be diverted over the overflow device is increased by this flow–sediment interaction in an uncontrolled way.

Since the interaction of side overflow with bed-load transport in a channel has not been studied so far, systematic flume experiments have been performed. Based on these experiments a one-dimensional empirical model to describe the longitudinal evolution of the aggraded channel reach has been developed. In addition, a simple and straightforward approach for direct estimation of the side overflow discharge in presence of bed-load transport has been established. To be universally valid in engineering practice all input variables of the models are expressed in terms of dimensionless parameters. Finally, the application of the design procedure is demonstrated in a case study on the Rhone river.

1. Einleitung

Zum Schutz gegen Überlaufen von Gerinnen bei extremen Hochwassern, zur Abführung des Regenabflusses in Kanalisationen oder zur Begrenzung des Abflusses in einem Gerinne ganz allgemein gilt es häufig, ab einer definierten Abflussmenge einen Teil davon seitlich abzuführen. Im Flussbau kann diese Aufgabe kann u. a. durch Streichwehre oder überströmbare Dämme erfüllt werden. Erreicht der Wasserspiegel im Hauptgerinne die Wehroberkante oder Dammkrone, wird der Volumenstrom seitlich über das Entlastungsbauwerk abgegeben.

Der seitliche Überfall ist eine typische Form des leicht ungleichförmigen Gerinneabflusses mit räumlich variierendem (hier abnehmendem) Abfluss. Das Hauptziel besteht primär darin, die seitliche Abflussmenge mittels der Bestimmung eines geeigneten Abflussbeiwertes zu ermitteln (Hager, 1987). Allen Untersuchungen zu diesem Thema ist gemein, dass ausschließlich von einer unbeweglichen Gerinnesohle ausgegangen wird. Vor dem Hintergrund des Hochwasserschutzes muss aber von natürlichen oder naturnahen Gewässern mit beweglichen Sohlen und der daraus resultierenden morphologischen Interaktion ausgegangen werden.

Die seitliche Wasserabgabe hat eine Abnahme der Geschiebetransportkapazität im Hauptgerinne zur Folge. Daher wird Geschiebmaterial im Gerinneabschnitt unterstrom des Überfalls abgelagert. Die in diesem Bereich auflandende Sohle bewirkt einen Rückstauereffekt und folglich eine größere Druckhöhe über dem Wehr und somit eine Erhöhung der seitlichen Überfallmenge. Lokale Energieverluste durch Querschnittseinengung und –aufweitung sowie durch Transportkörper verursachte Formrauheit verstärken diese Tendenz. Der ursprünglich zugrunde gelegte Bemessungsabfluss über das Bauwerk erfolgt nun unkontrolliert und ist nicht mehr bekannt. Mit weit reichenden Folgen wie z. B. ein vor der Hochwasserspitze erreichter Füllstand eines auf den Bemessungsabfluss dimensionierten Retentionsvolumens im Rahmen eines Hochwasserschutzkonzeptes muss gerechnet werden.

Im vorliegenden Beitrag wird ein auf systematischen hydraulischen Modellversuchen basierendes eindimensionales empirisches Modell vorgestellt, mit welchem die Form der Auflandung in Gerinnelängsrichtung und somit die Wechselwirkung zwischen seitlichem Überfall und Sohlenmorphologie abgeschätzt werden kann. Zur Beschreibung der Form der Auflandung ist eine Maxwell-Verteilungsfunktion verwendet worden. Die Eingangsvariablen der Verteilungsfunktion werden mittels geeigneter dimensionsloser geometrischer Gerinne- und Wehrparameter sowie hydraulischer und sedimentologischer Faktoren ausgedrückt. Für die Implementierung des empirischen Sohlenmodells in ein numerisches Simulationsprogramm ist die Lage hinsichtlich des Seitenüberfalls erforderlich. Zudem sind geeignete Randbedingungen zur Berücksichtigung von Formrauheiten zu wählen. Hierzu werden entsprechende Empfehlungen gegeben.

Für eine erste überschlägige Vorbemessung unter Berücksichtigung des Geschiebetriebs wird überdies ein Ansatz zur direkten Bestimmung des seitlichen Durchflusses vorgestellt. Der Ansatz beruht auf einer dimensionslosen Kombination der Abflussformel nach Gauckler-Manning-Strickler (GMS) sowie der Wehrformel für einen seitlichen Überfall. Auf diese Weise werden wie für das empirische Auflandungsmodell der Sohle Gerinne- und Wehrgeometrie sowie Strömungsparameter berücksichtigt. Der Einfluss des Geschiebetransportes wird hierbei implizit erfasst.

2. Hydraulische Modellversuche

Die Experimente wurden in einem rechteckigen, 30 m langen und 2,0 m breiten Versuchskanal durchgeführt (Abb. 1). Die Rinne wurde in Längsrichtung durch eine vertikale glatte Wand in einen 1,50 m breiten und einen 0,47 m breiten Kanal unterteilt. Der erste stellt den eigentlichen Versuchsstand mit der beweglichen Sohle ($d_{50} = 0,72 \text{ mm}$) und dem auf der rechten Seite angeordneten Streichwehr dar. Der zweite Rinnenabschnitt bildet einen parallel verlaufenden Kanal, in dem das seitlich über das Wehr entlastete Wasser abgeführt wird. Als maßgebliche Einflussgrößen sind der Abfluss im Hauptgerinne ($Q_I = 98 \div 222 \text{ l/s}$), die Sohlenneigung ($S_0 = 0,1 \div 0,4 \%$), die Länge der Wehrkrone ($L_D = 3,0 \text{ m}$, $2 \times 2,50 \text{ m}$ und $6,0 \text{ m}$) sowie die Anzahl der Wehre ($n_D = 1$ oder 2) untersucht worden.

Die Wasserspiegellagen wurden mittels Ultraschallsonden (US) gemessen. Zur Bestimmung des 2D-Geschwindigkeitsfeldes kamen Ultrasonic Doppler Velocity Profiler (UVP) zum Einsatz. Die Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM) der Sohlenmorphologie erfolgte mit einem photogrammetrischen Ansatz (Rosier et al. 2004).

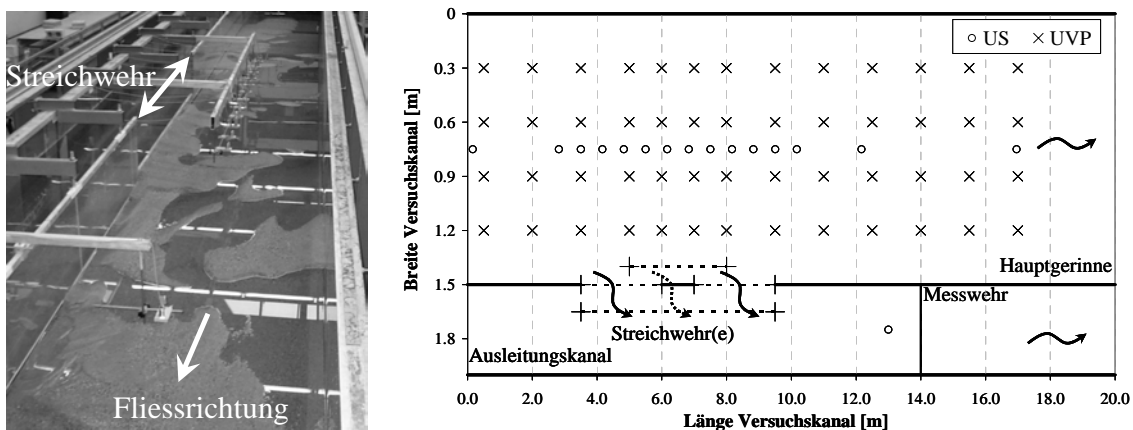


Abbildung 1: Links: Versuchsstand mit Hauptgerinne, seitlichem Überfall, mobiler Gerinnesohle und Evakuationsgerinne. Rechts: Schematische Draufsicht der Versuchseinrichtung und Anordnung der Wasserspiegellage- und Geschwindigkeitsmessstellen (US bzw. UVP)

3. Modell zur Beschreibung der Form der Auflandungsstrecke

3.1 Konzept und Methodik

Zur Beschreibung der Auflandungsstrecke in Längsrichtung sind querschnittsgemittelte Sohlenlängsprofile des digitalen Geländemodells verwendet worden (Abb. 2, oben). Um die globale Tendenz des Auflandungsbereiches zu erhalten, sind Sohlenformen unter Anwendung eines gleitenden Mittels herausgefiltert worden.

Für die Parametrisierung des geglätteten Sohlenlängsprofils ist eine Maxwell-Verteilungsfunktion verwendet worden (siehe Abschnitt 3.2). Die Eingangsparameter der Verteilungsfunktion sind dabei so gewählt worden, dass folgende vier Einflussgruppen Berücksichtigung fanden:

- Gerinnegeometrie,
- Wehrgeometrie,
- Strömungsparameter (Hydraulik) und
- Geschiebetransport.

Um die Allgemeingültigkeit des Modells zu gewährleisten, wurde bei der Parameterwahl aus den vier oben genannten Gruppen stets auf eine dimensionslose Kombination der jeweiligen Einflussgrößen geachtet.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das in den Modellversuchen beobachtete Sedimentdepot einen dreidimensionalen Charakter besitzt, d. h. neben einer Längsva-riation liegt auch eine Variation in Gerinnequerrichtung vor. Das hier vorgestellte Modell stellt somit eine Vereinfachung der tatsächlich gemessenen Auflandung dar. Ein dreidimensionales Sohlenmodell unter Berücksichtigung der Querneigung des Depots wird in Rosier (2007) beschrieben.

3.2 Maxwell Verteilungsfunktion

Die Auflandungsstrecke ist primär durch die maximale Auflandungshöhe (z'_{max}), deren Lage (x'_{max}) sowie durch dessen Form gekennzeichnet. Die Form kann mittels eines Formfaktors (n') beschrieben werden. Einen geeigneten Ansatz zur Parametrisierung der Auflandungsstrecke stellt die Maxwell-Verteilungsfunktion dar (Abb. 2, unten):

$$X' = \frac{x'}{x'_{max}}, \quad Z' = \frac{z'}{z'_{max}} \quad (1)$$

$$Z'(X) = \left(X' e^{1-X'} \right)^{n'} \quad (2)$$

Per Definition ist das Auflandungsmaximum $Z' = z'/z'_{max} = 1,0$ und befindet sich bei $X' = x'/x'_{max} = 1,0$.

Nach Anwendung des gleitenden Mittels auf das querschnittsgemittelte Sohlenlängsprofil werden der Anfangs- und Endpunkt der Auflandung bestimmt (Abb. 2, oben). Diese Punkte sind durch eine signifikante Änderung der Steigung im Vergleich zum vorausgehenden- bzw. nachfolgenden Profilabschnitt gekennzeichnet. Die Verbindungstangente an diese lokalen Minima dient als Referenzniveau, von welchem mittels Differenzenbildung die Nettoauflandungsstrecke extrahiert wird (Abb. 2, mitte). Anschließend werden die maximale Höhe und deren Lage für die extrahierte Auflandungsstrecke bestimmt und die Maxwell-Verteilungsfunktion auf diese Werte angewandt (Abb. 2, unten). Der Formfaktor n' wird hierbei mittels des trial-and error Prinzips bestimmt, indem n' so lange variiert wird, bis nach der Methode der Kleinsten Fehlerquadrate die vertikale Abweichung zu einem Minimum wird.

3.3 Maximale Höhe des Depots z'_{max}

Zur Bestimmung der maximalen Höhe der Auflandungsstrecke (z'_{max}) werden Parameter zur Beschreibung der Gerinne- und Wehrgeometrie sowie der Strömungsbedingungen kombiniert. Zu diesem Zweck wird das Verhältnis von seitlicher Überfallmenge (Q_D), ausgedrückt mit der allgemeinen Wehrüberfallformel, zum Abfluss im Gerinne (Q_I), ausgedrückt mit der Stricklerformel (GMS), eingeführt:

$$\frac{Q_D}{Q_I} = \frac{2/3 C_D \sqrt{2g} (y_1 - w_D)^{3/2} L_D}{R_{h,1}^{2/3} k_{st} S^{1/2} B y_1} \quad (3)$$

mit Q_D seitlicher Ausfluss, Q_I Zufluss oberhalb des Wehres, C_D Abflussbeiwert für ein scharfkantiges Streichwehr, g Erdbeschleunigung, $y_1 - w_D = h_{D,1}$ Überfallhöhe,

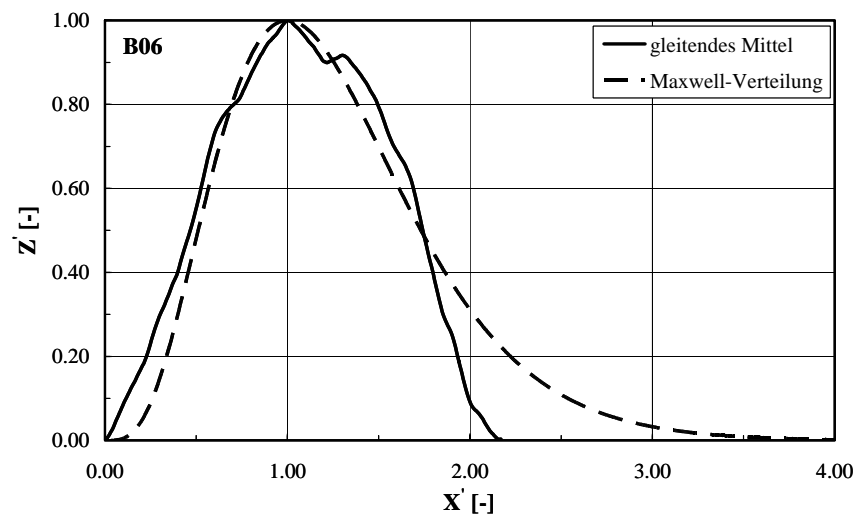
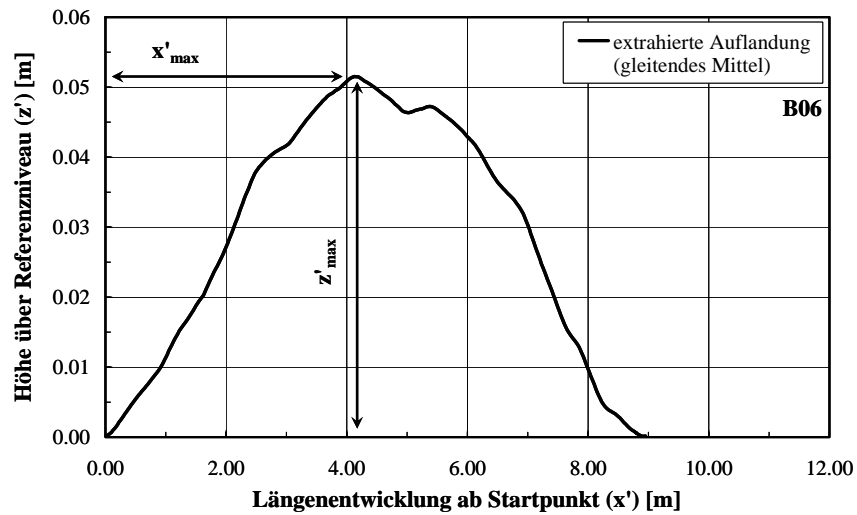
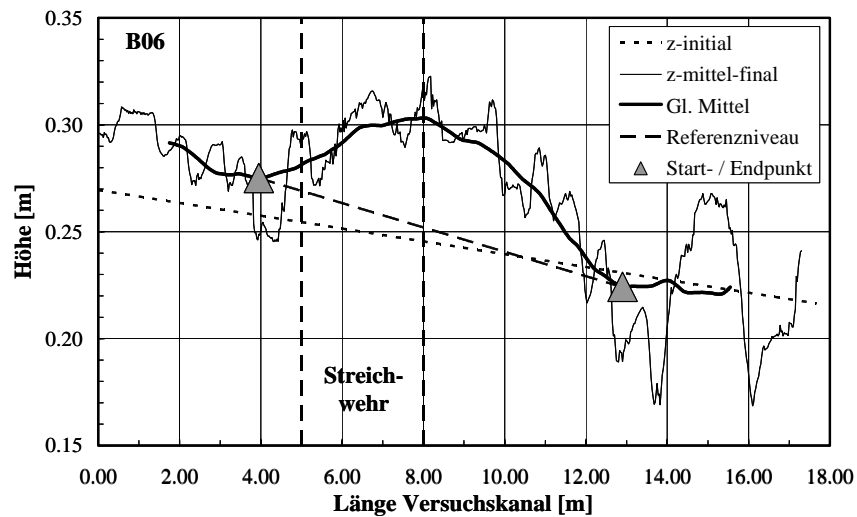


Abbildung 2: Oben: Ausgangssohlenlage, querschnittsgemittelte Sohle nach Versuchsende, dazugehöriges gleitendes Mittel, Anfangs- und Endpunkt der Auflandungsstrecke (Depot) sowie Verbindungstangente als Referenzniveau. Mitte: Extrahierte Auflandungsstrecke. Unten: Mit den jeweiligen Maximalwerten normierte Auflandungsstrecke sowie dazugehörige angepasste Maxwell-Verteilungsfunktion

y_I Abflusstiefe oberhalb des Wehres, w_D Wehrhöhe, L_D Wehrlänge, k_{st} Stricklerbeiwert, $R_{h,I}$ hydraulischer Radius, S Neigung der Energielinie und B Kanalbreite. Der Index I bezieht sich auf den Wehranfang.

Die Sedimenttransportbedingungen unter- und oberhalb des Wehres können mittels der dimensionslosen Geschiebetransportkapazität (Einsteinfaktor) wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Delta\Phi = \frac{\Phi_{\text{unterstrom}}}{\Phi_{\text{oberstrom}}} \quad (4)$$

Zur dimensionslosen Darstellung der maximalen Höhe des Depots wird die Depothöhe (z'_{\max}) mit der Druckhöhe über dem Streichwehr ($h_{D,I}$) kombiniert.

Unter Verwendung genetischer Algorithmen (Keijzer und Babovic, 1999) konnte folgende Beziehung für die maximale Höhe der Auflandung ermittelt werden:

$$\frac{h_{D,I}}{z'_{\max}} = \frac{\Delta\Phi}{Q_D/Q_1} \left(3\Delta\Phi - \frac{9}{5} \right) + \frac{9}{4} \quad (5)$$

Da die seitliche Überfallmenge (Q_D) und das Verhältnis der Transportraten ($\Delta\Phi$) zunächst nicht bekannt sind, erfordert die Lösung von Gleichung 5 unter Verwendung von Gleichung 3 und 4 eine iterative Berechnung. Um den Startwert für die iterative Berechnung zu erhalten, wird die Situation einer ebenen Sohle betrachtet.

3.4 Lage der maximalen Höhe des Depots x'_{\max}

Da gemäß Definition $X' = x'/x'_{\max} = 1,0$ gilt (vgl. Abschnitt 3.2 und Abb. 2, unten), kann die x-Achse des Depots konstruiert werden. Zwischen $X' = 0,0$ und $X' = 1,0$ und für den Bereich $X' > 1,0$ können beliebig wählbare Schrittweiten verwendet werden. Für die maximale Ausdehnung nach rechts ist aufgrund der systematischen Versuche $X' = 4,0$ bis $X' = 6,0$ erhalten worden.

Ähnlich wie für die maximale Auflandung (z'_{\max}) erfordert die Implementierung des empirischen Modells des Sedimentdepots in ein numerisches Modell eine dimensionsbehaftete Größe x'_{\max} in [m]. In guter Näherung kann ein Wert von $x'_{\max} \approx 4,00$ m verwendet werden. Bei der Übertragung in den Prototyp ist zwingend der geometrische Modellmaßstab von etwa 1:50 zu berücksichtigen.

3.5 Formfaktor n

Für den Formfaktor wurde folgende lineare Beziehung unter Einbeziehung des Verhältnisses von Wehrlänge (L_D) zu Gerinnebreite (B) gefunden:

$$n' = \frac{3}{4} \frac{L_D}{B} + \frac{7}{3} \quad (6)$$

4. Bemessungskonzept

Das Bemessungskonzept sieht im Wesentlichen die folgenden drei Schritte vor, die schematisch in Abbildung 3 dargestellt sind:

1. Bestimmung der Geometrie der Auflandungsstrecke,
2. Implementierung der empirisch erhaltenen Geometrie der Auflandung in ein eindimensionales Abflussberechnungsprogramm und

3. Wahl geeigneter Randbedingungen im Abflussberechnungsprogramm (z. B. HEC-RAS); insbesondere eine adäquate Erfassung der durch Sohlenformen induzierten Formrauheit.

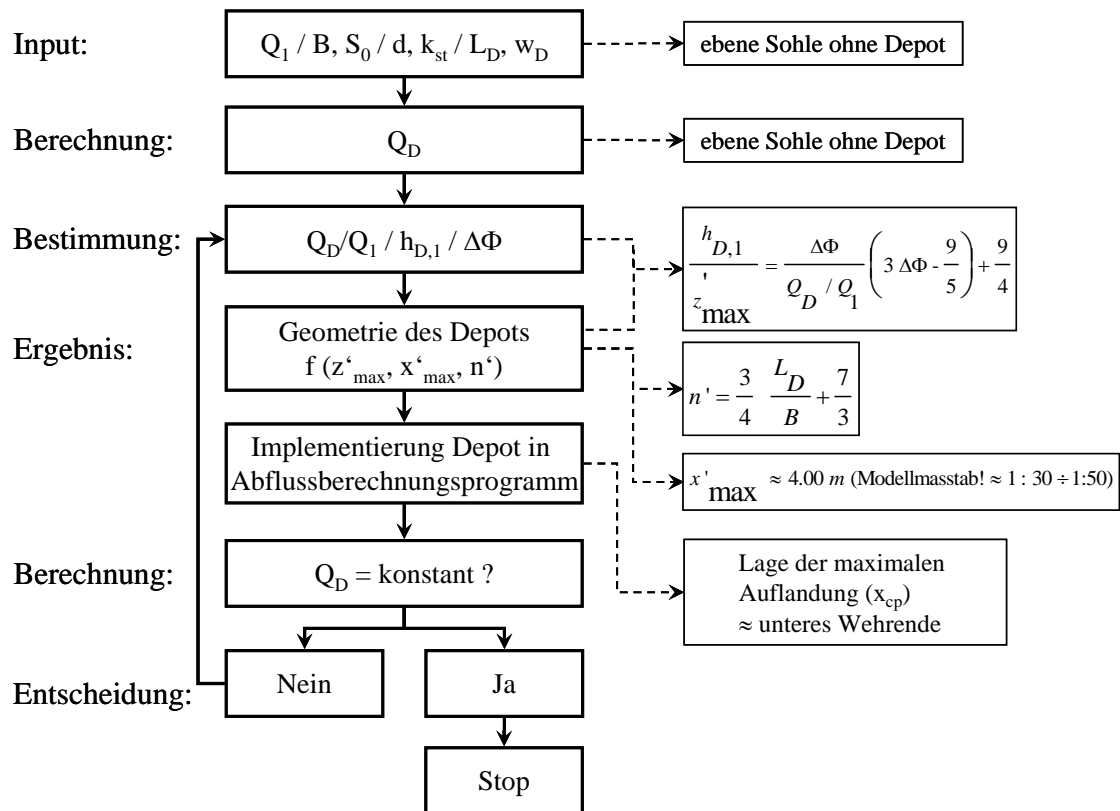


Abbildung 3: Schematische Übersicht des Bemessungskonzeptes und Berechnungsvorgang

Der erste Schritt besteht in der Bestimmung der in den Abschnitten 3.3 bis 3.5 beschriebenen Eingangsparametern der Maxwell-Verteilungsfunktion (z'_{\max}, x'_{\max}, n').

Nachdem die Geometrie des Depots bestimmt ist, wird das empirische Modell für die Geometrie des Depots in ein Abflussberechnungsprogramm implementiert, welches einen Seitenüberfall berücksichtigen kann (Schritt 2). Die maximale Auflandung befindet sich relativ nahe am unteren Wehrende, wo die Diskontinuität zwischen Strömung und Sedimenttransportkapazität am größten ist. Folglich kann das modellierte Sedimentdepot am unteren Wehrende positioniert werden (x_{cp}).

Im dritten und letzten Schritt wird dem Sedimentdepot eine geeignete Sohlenrauheit überlagert. Sie setzt sich in der Regel aus einer Korn- und einer Formrauheit zusammen. In der vorliegenden Studie ist die Formrauheit vornehmlich auf Dünen zurückzuführen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Ansatz nach Yalin und da Silva (2001) gute Ergebnisse erzielt werden (Rosier et al., 2005).

Da die Parameter Q_D / Q_1 sowie $\Delta\Phi$ zur Berechnung für z'_{\max} zunächst nicht bekannt sind, werden diese Werte zunächst für den Fall einer ebenen Sohle bestimmt. Mit diesen Startwerten erfolgt nun eine iterative Berechnung, bis die seitliche Überfallmenge (Q_D) konstant ist. Hieraus kann implizit geschlossen werden, dass das Sedimentdepot seine endgültige Form im Gleichgewichtszustand erreicht hat. Die Geschiebetransportkapazität unter- und oberhalb der Entlastung ($\Delta\Phi$) kann mit

herkömmlichen Transportformeln, z. B Meyer-Peter und Müller (1948), berechnet werden. Hierbei ist zwingend zu überprüfen, ob die maximale Höhe der Auflandung nicht durch ein neues Gleichgewichtsgefälle ausgehend von einem unterhalb des Wehres liegenden Sohlenfixpunktes bestimmt wird.

5. Ansatz zur direkten Abschätzung des Entlastungsabflusses

Anstatt das Sedimentdepot zu modellieren, in ein Abflussberechnungsprogramm zu implementieren, um schließlich die seitliche Überfallmenge zu erhalten, kann es für eine erste Abschätzung im Rahmen einer Vorbemessung ausreichend bzw. wünschenswert sein, den Einfluss der mobilen Gewässersohle auf den Entlastungsabfluss mit einem einfach anzuwendenden Ansatz direkt zu bestimmen.

Hierzu werden die GMS-Abflussformel und die Beziehung für den seitlichen Wehrüberfall (vgl. Gl. 3) verwendet. Diese beiden Gleichungen spiegeln die Gerinneigenschaften (Geometrie, Sohlenbeschaffenheit), die Strömungssituation sowie die Wehrcharakteristika wieder. Die Auflandungsphänomene (Geschiebetransport) sind implizit enthalten, da sich die verwendeten Versuchsdaten auf die Endsituation mit dem ausgebildeten Sedimentdepot beziehen. Beide Gleichungen können mittels einer Froude-Zahl wie folgt in dimensionsloser Schreibweise formuliert werden:

$$\frac{Q_1}{B y_1^{3/2} \sqrt{g}} = Fr_1 \quad (7)$$

$$\frac{Q_D}{L_D y_1^{3/2} \sqrt{g}} = Fr_D \quad (8)$$

Die Froude-Zahl Fr_D kann als Wehr-Froude-Zahl bezeichnet werden, da sie im Gegensatz zur herkömmlichen Froude-Zahl (Fr_1) mit der seitlichen Überfallmenge (Q_D anstatt Q_1) und der Wehrlänge (L_D anstatt B) gebildet wird.

Wird das Verhältnis von Fr_D zu Fr_1 zur Druckhöhe über dem Wehr ($h_{D,1}$) und der Wehrlänge (L_D) gesetzt, so ergibt sich anhand der systematischen Modellversuche folgender Ansatz zur direkten Abschätzung der seitlichen Überfallmenge unter Berücksichtigung der Auflandungsphänomene:

$$\frac{h_{D,1}}{L_D} = 0.037 \left(\frac{Fr_D}{Fr_1} \right)^{0.53} \quad (9)$$

In der Regel sind $h_{D,1}$, L_D und Fr_1 bekannt oder können leicht bestimmt werden, so dass sich der Seitenüberfall (Q_D) mit Gl. 8 ermitteln lässt.

6. Praktisches Anwendungsbeispiel

Das vorgestellte Konzept soll anhand eines konkreten Berechnungsbeispiels unter Prototypbedingungen näher vorgestellt werden. Hierzu wird die Rhone oberhalb des Genfer Sees im Wallis zwischen Sion und Branson betrachtet (*km 45,177*, unterhalb Riddes, Pont Saxon). Die Charakteristik der Rhone sei wie folgt gegeben: $B = 40 \text{ m}$, $S_0 = 0,10 \%$, $d_{50} = 35 \text{ mm}$, $d_m = 60 \text{ mm}$, $k_{st,Korn} = 37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $k_{st,Form} = 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Für das hundertjährige Bemessungshochwasser von $HQ_{100} = 1260 \text{ m}^3/\text{s}$ ist die Abflusskapazität der Rhone ausreichend. Zur Erhöhung des Schutzgrades für höhere Wiederkehrintervalle oder gar ein Extremereignis ($EHQ_{100} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie zur Beherrschung des Restrisikos soll ein $w_D = 7,35 \text{ m}$ hohes und $L_D = 200 \text{ m}$ langes Streichwehr im Hochwasserschutzdamm installiert werden.

Für die numerische Berechnung wird das 1D-Programm DUPIRO verwendet (Boillat et al., 2006). Nahezu identische Ergebnisse können mit dem in der Ingenieurspraxis weit verbreiteten Programm HEC-RAS erzielt werden.

Der Startwert für die ebene Sohle mit $z'_{max} = 0,00 \text{ m}$ und $Q_1 = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (EHQ) ergibt sich zu $Q_D = 288 \text{ m}^3/\text{s}$ mit $Q_D/Q_1 = 0,18$, $h_{D,1} = 1,16 \text{ m}$, $\Phi_{oberstrom} = 0,035$, $\Phi_{unterstrom} = 0,022$ und $\Delta\Phi = 0,63$. Nach mehreren Iterationsschritten (hier: 8 Iterationen) ändert sich der Entlastungsabfluss nicht mehr und beträgt $Q_D = 318 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_D/Q_1 = 0,20$, $h_{D,1} = 1,33 \text{ m}$, $\Phi_{oberstrom} = 0,038$, $\Phi_{unterstrom} = 0,019$ und $\Delta\Phi = 0,50$). Die dazugehörige stabile Depothöhe im Endzustand ergibt sich zu $z'_{max} = 0,89 \text{ m}$ (Abb. 4).

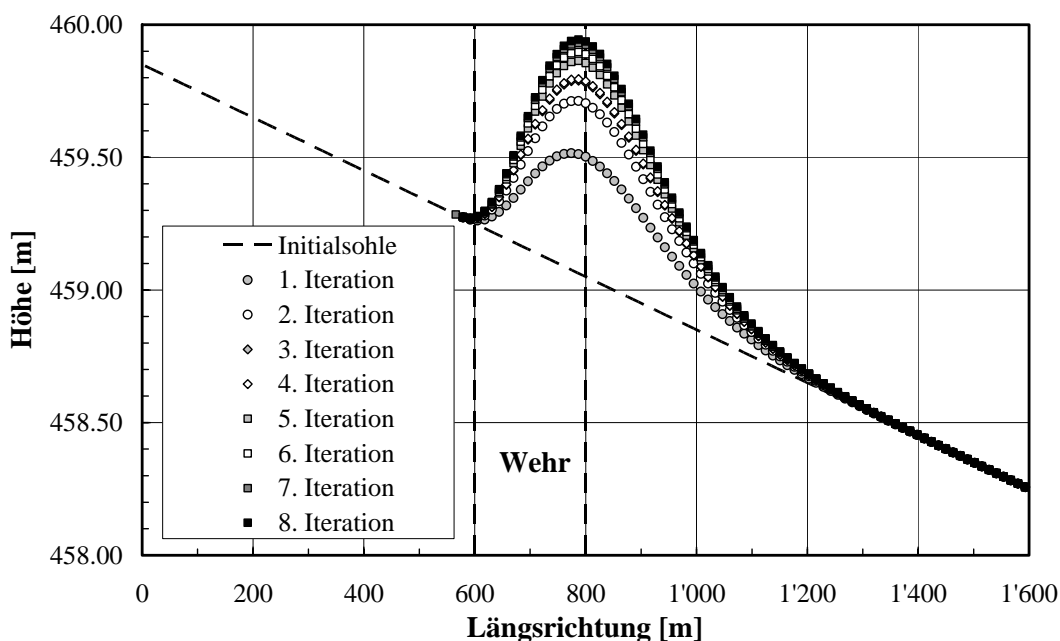


Abbildung 4: Entwicklung des Depots für verschiedene Iterationsschritte

Mit den Werten des letzten Iterationsschrittes und $y_1 = 8,84 \text{ m}$, $Fr_1 = 0,486$ und $Fr_D = 0,019$ wird für den Ansatz zur direkten Abschätzung ein Überfall von $Q_D = 314 \text{ m}^3/\text{s}$ erhalten.

Die Überfallmenge steigt demnach um einen Faktor von $318/288 = 1.10$ bzw. $314/288 = 1.09$. Dies bedeutet, dass unter Berücksichtigung der Morphologie im Gegensatz zu $Q_2 = Q_1 - Q_D = 1600 - 288 = 1312 \text{ m}^3/\text{s}$ nur noch etwa $Q_2 = 1284 \text{ m}^3/\text{s}$ im Gerinne unterhalb des Wehres abgeführt werden müssen (Abb. 5). In diesem Zusammenhang muss allerdings zwingend überprüft werden, ob die vorhandene Speicherkapazität des Retentionsraumes für das höhere seitliche Überfallvolumen ausreichend ist.

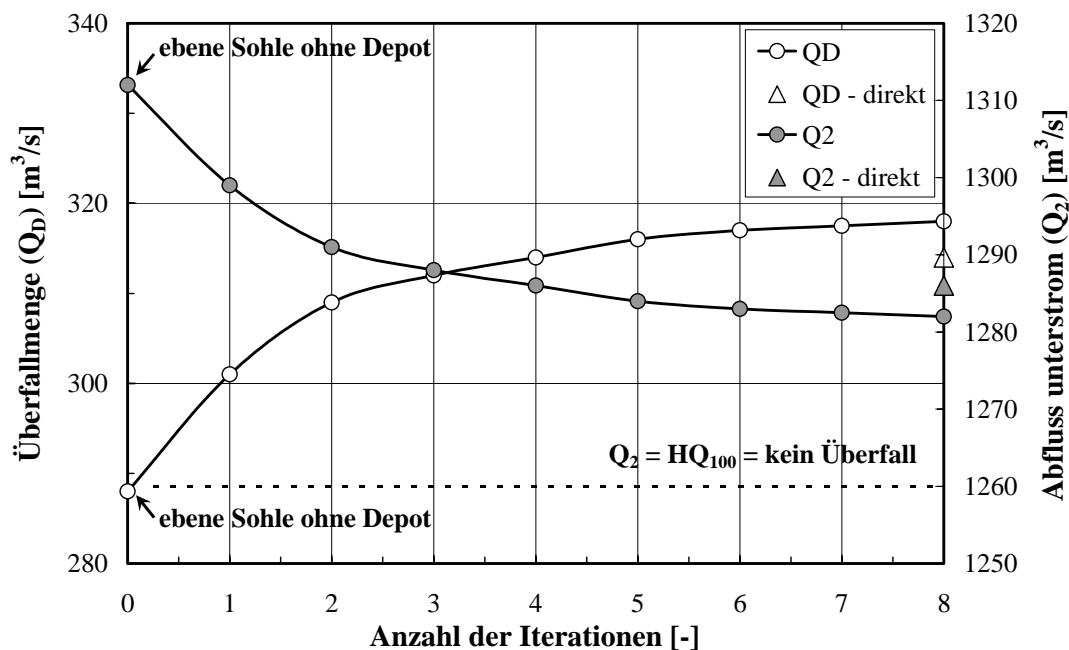


Abbildung 5: Seitliche Überfallmenge (Q_D) und im Gerinne weitergeführter Durchfluss (Q_2) für einen Zufluss von $EHQ = 1600 m^3/s$ in Abhängigkeit der Depothöhe bzw. der Iterationsschritte

7. Gültigkeitsbereich der empirischen Ansätze und Fehlerbetrachtung

Die Berücksichtigung morphologischer Prozesse bei der Bemessung einer seitlichen Notentlastung stellt ein neues Bemessungskonzept im Hochwasserschutz dar

Demzufolge existieren nur wenige bzw. nahezu keine Grundlagendaten aus Modellversuchen und quasi keine Erfahrungen in der Praxis. Aus diesem Grund orientiert sich das hier vorgestellte Bemessungskonzept trotz der Bemühung um dimensionslose Darstellung sehr eng an die systematisch durchgeführten Modellversuche.

Das Anwendungsgebiet der vorgestellten Methodik sind Gewässer mit milder Sohlenneigung im Gefällsbereich von $0,10 \% \leq S_0 \leq 0,40 \%$. Das Abflussregime bewegt sich ausschließlich im strömenden Bereich mit allerdings relativ hohen Froude-Zahlen ($Fr_l \geq 0,45$), da seitliche Notentlastungen im Rahmen von Hochwasserschutzkonzepten in der Regel erst ab hundertjährigen Ereignissen in Betrieb sind. Die relative Rauheit des verwendeten sandig-kiesigen Sohlenmaterials lässt sich mit $40 \leq y/d_{90} \leq 70$ angeben. Hinsichtlich der Gerinne- und Wehrgeometrie bewegen sich die Modelluntersuchungen im Bereich von $2,00 \leq L_D/B \leq 4,00$. Die untersuchten Abflüsse liegen im Bereich von $0,06 \leq Q_D/Q_l \leq 0,37$.

Eine Fehlerbetrachtung hinsichtlich der Genauigkeit der verwendeten Messverfahren lässt darauf schließen, dass der gemessene seitliche Ausfluss eine Genauigkeit von etwa $\pm 3,5 \%$ aufweist. Das 95 % Vertrauensintervall für die Beziehung zur Ermittlung der maximalen Auflandungshöhe ($h_{D,1/z'_{max}}$, Gl. 5) liegt bei $\pm 0,85$. Der mit einem 1D Abflussberechnungsprogramm vorhergesagte Entlastungsabfluss basierend auf der Implementierung des empirischen eindimensionalen Auflandungsmodells beträgt ca. 85 % des gemessenen seitlichen Ausflusses. Dies ist zum einen auf den 1D-Charakter des numerischen Simulationswerkzeuges zurückzuführen, zum anderen auf das eindimensional abstrahierte in Realität dreidimensionale Sedimentdepot. Folglich kann

davon ausgegangen werden, dass das empirische Modell den Seitenausfluss tendenziell unterschätzt. Diese Aussage wird durch die Tatsache unterstützt, dass unter Berücksichtigung der Querverteilung der Auflandung 91 % anstatt 85 % des gemessenen seitlichen Ausflusses vorhergesagt werden (Rosier, 2007).

Bibliographie

- Boillat, J.-L., Dubois, J., Nilipour, N.** (2006). *Migration of a dredging pit in the Rhone river*; Proc. 3rd Int. Conference on Fluvial Hydraulics - RiverFlow, Lisbon – Portugal, 1193-1202
- Hager, W. H.** (1987). *Lateral outflow over side weirs*; Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 113 (4), 491-504
- Keijzer, M., Babovic, V.** (1999). *Dimensionally aware genetic programming*; Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conference – GECCO, Orlando – USA
- Meyer-Peter, E., Müller, R.** (1948). *Formulas of bed-load transport*; Report on the second meeting of the IAHSR (heute IAHR), Stockholm – Sweden, 39-64
- Rosier, B.** (2007). *Bed evolution due to lateral water withdrawal*; 32th IAHR Congress, Venice – Italy
- Rosier, B., Boillat, J.-L., Schleiss, A. J.** (2004). *Mapping of bed morphology for lateral overflow using digital photogrammetry*; 2nd International Conference on Scour and Erosion - ICSE-2, Singapore – Singapore
- Rosier, B., Boillat, J.-L., Schleiss, A. J.** (2005). *Influence of side overflow induced local sedimentary deposit on bed form related roughness and intensity of diverted discharge*; 31th IAHR Congress, Seoul – South Korea, 1639-1650
- Yalin, M. S., da Silva, A. M. F.** (2001). *Fluvial processes*; IAHR Monograph, Delft, The Netherlands

Danksagung

Das im vorliegenden Artikel vorgestellte Forschungsprojekt wurde von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI, Nr. 4898.1) sowie dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

Adresse der Autoren

Dr. Burkhard Rosier, Dr. Jean-Louis Boillat und Prof. Dr. Anton Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

EPFL ENAC ICARE LCH

GC A3 504 (Bâtiment GC)

Station 18

1015 Lausanne, Schweiz

+41-21-693 23 85

<http://lchwww.epfl.ch>

burkhard.rosier@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Einfluss von grossmasstäblichen Uferrauheiten und Buchten auf Schwallwellen in Flüssen infolge Kraftwerksbetrieb

Tobias Meile, Dr. Jean-Louis Boillat und Prof. Dr. Anton Schleiss

Zusammenfassung

Zur Deckung der Verbrauchsspitzen an elektrischer Energie turbinieren die Speicherkraftwerke das Wasser der Stauseen gemäss Nachfrage ab. Dies führt in den betroffenen voralpinen und alpinen Fliessgewässern zu raschen Abfluss- und Wasserspiegelschwankungen, welche besonders in den Wintermonaten mit geringem Basisabfluss ausgeprägt sind. Um diese aus gewässerökologischer Sicht ungünstigen Schwankungen zu vermindern, sind nebst wasserbaulichen Massnahmen wie Rückhaltebecken auch flussbauliche Massnahmen denkbar. Einerseits kann die Fließretention vergrössert werden, andererseits bieten solche Massnahmen morphologisch interessantere Lebensräume als ein kanalisiertes Gerinne.

Die im Modell untersuchten grossmasstäblichen Uferrauheiten und Buchten beeinflussen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Form der (Schwall)wellen in Folge des erhöhten Fliesswiderstandes und der passiven Retention. Der Einfluss von Uferformrauheitselementen auf den Fliesswiderstandsbeiwert eines Querschnittes kann mittels empirischer Formeln berücksichtigt werden. Die passive Retention wurde in ein 1-dimensionales numerisches Modell integriert. Die effektive Wirkung von möglichen flussbaulichen Massnahmen auf die dynamischen Abflussvorgänge kann so gewässerspezifisch bestimmt werden. Im Vergleich zu gesteuerten Rückhaltebecken ist die Wirkung von flussbaulichen Massnahmen auf die Abflüsse insbesondere für lange Turbiniersequenzen grundsätzlich weniger effizient, da grössere Flächen zur Bereitstellung der Volmen notwendig wären und diese nicht aktiv bewirtschaftet werden können.

Résumé

Les centrales hydroélectriques à accumulation couvrent les pointes de consommation en énergie électrique par turbinage séquentiel. Sur les cours d'eau alpins et préalpins concernés, ce mode d'exploitation provoque des variations de débit et de niveau relativement rapides. Celles-ci sont particulièrement marquées en hiver quand le débit de base est faible. Pour réduire ce marnage, défavorable du point de vue écologique, des mesures constructives tels que des bassins de rétention sont possibles. L'aménagement morphologique du cours d'eau peut également produire un effet de rétention et simultanément offrir des habitats plus intéressants que un cours d'eau canalisé.

Afin d'évaluer l'efficacité de telles mesures, différentes configurations de baies riveraines ont été investiguées expérimentalement. Ces espaces additionnels ont pour effet d'augmenter le volume de rétention du cours d'eau mais aussi d'accroître la rugosité des rives. Il en résulte une atténuation de la vitesse de propagation et un aplatissement des intumescences. L'influence de la nouvelle rugosité des rives sur le coefficient de frottement peut être décrite par des formules empiriques et la rétention passive peut être pris en compte dans des modèles numériques unidimensionnels. L'effet d'un aménagement morphologique des rives peut ainsi être déterminé. En comparaison avec des bassins de rétention régulés, l'effet de laminage obtenu sur le cours d'eau est moindre, notamment pour des séquences de turbinages de longue durée.

1. Einleitung

Speicherkraftwerke erlauben die Verbrauchsspitzen an elektrischer Energie abzudecken, indem die Turbinen entsprechend der Nachfrage betrieben werden. Erfolgt die Wasserrückgabe direkt in ein Gewässer führt dies zu Schwall- und Sunkerscheinungen, das heisst zu relativ schnell wechselnden Abflussbedingungen zwischen maximalen und minimalen Wasserspiegeln im Gewässerquerschnitt sowie zur Fortpflanzung von dynamischen Wellen im Gewässerabschnitt. Aus Sicht der Gewässerökologie stellen diese täglich und schnell wechselnden Abflussbedingungen eine Störung des natürlichen Abflussregimes dar und wirken sich neben einer monotonen Gewässermorphologie oder schlechter Wasserqualität negativ auf die Lebensbedingungen im Gewässer aus (Baumann und Klaus 2003, Meile et al. 2005).

Grossmassstäbliche Uferrauheiten und Buchten erhöhen die Rauheit und die passive Retention eines Gewässers was die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Form der (Schwall)wellen beeinflusst. Um den Einfluss von grossmassstäblichen Uferrauheiten und Buchten auf Schwallwellen in Flüssen infolge Kraftwerksbetrieb besser zu verstehen, wurden systematische Versuche mit stationären und instationären Abflüssen (Schwallwellen mit steiler Front & Sunkwellen) in einem Laborkanal durchgeführt, welcher mit einer grossen Anzahl von verschiedenen Geometrien von grossmassstäblichen Uferrauheiten ausgestaltet wurde. Die beschränkte Länge des Laborkanals widerspiegelt die Abflussvorgänge wie sie in der Natur im Gerinne unmittelbar unterhalb der Wasserrückgaben vorkommen (500 m bis 1500 m je nach Umrechnungsmassstab). Die systematischen Versuche mit grossmassstäblichen Uferrauheiten erlaubten empirische Fliesswiderstandsbeiwerte für die Praxis zu entwickeln, welche auch für instationäre Abflussberechnungen in numerischen Modellen verwendet werden können.

2. Schwall-/Sunk-Kenngrössen & schwallreduzierende Massnahmen

Eine Analyse der schweizerischen Pegelmessstationen zeigt, dass hauptsächlich mittlere bis grössere Talflüsse der Alpen und Voralpen vom Schwall/Sunk betroffen sind (Baumann und Klaus 2003). An einer Pegel-/Abflussmessstation kann der Schwall und Sunk anhand von Kenngrössen erfasst werden (Abbildung 1). Die täglichen Abflussschwankungen sind mit dem Schwall-/Sunkverhältnis Q_{max}/Q_{min} oder der relativen Schwall-/Sunkdifferenz $(Q_{max}-Q_{min})/Q_{mittel}$ beschrieben. Die Schwall- und Sunkraten dQ/dt beschreiben die Schnelle der Abflusswechsel, wobei der Wert auch von der zeitlichen Auflösung der zur Verfügung stehenden Daten abhängt (Pfaundler und Keusen 2007). Die täglichen, maximalen Werte dieses Parameters beschreiben die

stärkste zeitliche Veränderung des Abflusses während die statistische Auswertung desselben gleichzeitig auch die Häufigkeit der Wechsel beinhaltet (Meile et al. 2005). In alpinen und voralpinen Gewässern wären die Kenngrössen Q_{max}/Q_{min} und dQ/dt im Winterhalbjahr natürlicherweise am Kleinsten. Unter dem Einfluss von Schwall und Sunk nehmen die Kenngrössen aber oft gerade in dieser Periode die grössten Werte an. Weitere Kenngrössen sind der tägliche Maximalschwall Q_{max} , massgebend für Geschiebetrieb und Resuspension, die Anzahl Schwallspitzen pro Tag sowie die Volatilität (Pfaundler und Keusen 2007).

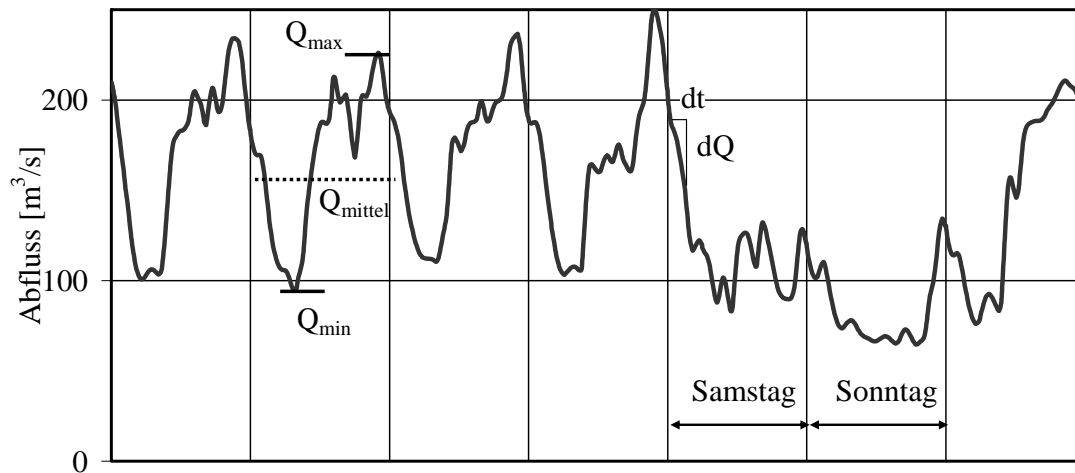


Abbildung 1: Typische Abflussschwankungen an der Rhone in Porte du Scex für eine Oktoberwoche im Jahre 2003 mit Definition der Schwallkennwerte.

Ökologisch als akzeptabel erachtete Richt- und Grenzwerte, z. B. betreffend des Schwall-/Sunkverhältnisses, weisen je nach untersuchtem Gewässertyp eine grosse Bandbreite auf. Dies deutet darauf hin, dass insbesondere in grossen Gewässern zur sinnvollen Schwalldämpfung eine gewässerspezifische Zusammenstellung von Grenzwerten erstellt werden sollte. Solch massgeschneiderte Kriterien wurden am Alpenrhein definiert und dazu verwendet, verschiedene mögliche Szenarien einer Schwallregelung zu entwickeln (Schälchli et al., 2003).

Zur Schwalldämpfung sind theoretisch verschiedene wasserbauliche, flussbauliche und betriebliche Massnahmen möglich (Meile 2006). Betriebliche Massnahmen schränken den Betrieb der Speicherkraftwerke aber stark ein und verursachen Kosten, die deutlich höher liegen als z.B. der Bau von Ausgleichsbecken (Wickenhäuser et al. 2005). Zudem müsste der fehlende Spitzenstrom anderweitig beschafft werden, z.B. mit Gaskombikraftwerken, was wiederum die CO₂ Emissionen erhöhen würde. Wasserbauliche Massnahmen wie Ausgleichsbecken benötigen zwar auch grössere Investitionen und Landbedarf, sind aber energiewirtschaftlich oft die einzige sinnvolle Lösung. Eine Studie basierend auf 14 Messstellen an 6 schwallbeeinflussten grösseren Gewässern der Schweiz untersuchte die notwendigen Rückhaltevolumen zur Einhaltung bestimmter Schwall-/Sunkverhältnisse im Tages- und Wochenausgleich. Bei längeren Schwallimpulsen und zur Auffüllung des Sunks am Wochenende sind grosse Volumina notwendig (VAW-LCH 2006), wie sie nur durch Rückhaltebecken respektive Mehrzweckbecken (Heller et al. 2007) zur Verfügung gestellt werden können. In Flusssystemen mit Zentralen an verschiedenen Standorten und grosser Länge müssen

Fliess- und Turbinierzeiten bei der Wahl von geeigneten Standorten und dem Betrieb von Rückhaltebecken berücksichtigt werden. Grössere Becken direkt auf dem Hauptfluss sind vorteilhaft, da im selben Becken die Schwallspitzen verschiedener Zentralen gedämpft werden können und diese nicht zwingend gleichzeitig beim Becken eintreffen.

Flussbauliche Massnahmen wie die Verbesserung der Flussmorphologie zur Reduktion von Schwallwellen wurden in einer umfangreichen Parameterstudie von Stranner (1996) im numerischen Modell untersucht. Nebst dem Einfluss der Neigung (S_0) der Turbinierdauer (T) des Basisabflusses (Q_b), des Turbinenabflusses inklusive Basisabfluss (Q_{total})¹ und der Rauheit (K_{st}) wurden auch ständig benetzte Flächen seitlich des Flusses untersucht, die zur passiven Retention führen. Anhand von Bemessungsdiagrammen kann die Auswirkung der Parameter auf die Schwallwellen flussabwärts bestimmt werden.

3. Einfluss von Rauheiten und Buchten auf Schwallwellen im Experiment

3.1 Theoretische Grundlagen

Im reibungsfreien, horizontalen Rechteckkanal pflanzt sich die Front einer Schwallwelle, verursacht durch eine plötzliche Abfluss- oder Wasserstandsänderung, mit der absoluten Wellengeschwindigkeit V_w fort:

$$V_w = U_1 + \sqrt{gh_1} \cdot \sqrt{\frac{h_2}{2h_1} \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (1)$$

Geht man davon aus, dass die Höhe der Wellenfront im Vergleich zur Wassertiefe gering ist, nähert sich der zweite Term der Gleichung dem Wert 1 an. Im reibungsfreien Horizontalkanal schwächt sich weder die Fortbreitungsgeschwindigkeit V_w noch die Höhe der Front h' ab (Abbildung 2, oben).

Bei Berücksichtigung der Reibung und Sohlenneigung, wie sie in der Natur immer vorhanden ist, unterliegt die Fortpflanzung der Schwallwelle dynamischen Abläufen die durch die Schrägstellung der Wasseroberfläche verursacht werden. Unter diesen Bedingungen nimmt die Höhe der Wellenfront, exponentiell mit der Fliessstrecke ab (Favre 1935) und kann ganz verflachen (Abbildung 2, unten). Zur Berechnung solcher instationärer Strömungen können die Saint-Venant Gleichungen (Kontinuitätsgleichung und dynamische Gleichung) herbeigezogen werden wobei die resultierenden Differenzialgleichungen mit numerischen Verfahren gelöst werden. Dies gilt auch zur Bestimmung ob sich überhaupt eine steile Wellenfront ausbildet oder die Wellenfront verflacht (Henderson 1966).

Im Falle einer raschen Änderung des Abflusses durch die Turbinen von Speicherkraftwerken resultieren die Strömungsverhältnisse in einem Gewässerabschnitt aus dem komplexen Zusammenspiel von Sohlenneigung, Reibung, dem Verhältnis zwischen Totalabfluss Q_{total} und Basisabfluss Q_b und der Dauer Δt um vom Basis- zum Totalabfluss an der Rückgabestelle zu gelangen.

¹ Hier wird bewusst Q_b von Q_{min} und Q_{total} von Q_{max} unterschieden. Q_b und Q_{total} sind auf den Ort der Rückgabe und Q_{min} und Q_{max} sich auf einen beliebigen Querschnitt flussabwärts bezogen. Q_{min} und Q_{max} beinhalten demzufolge eine allfällige Fliessretention.

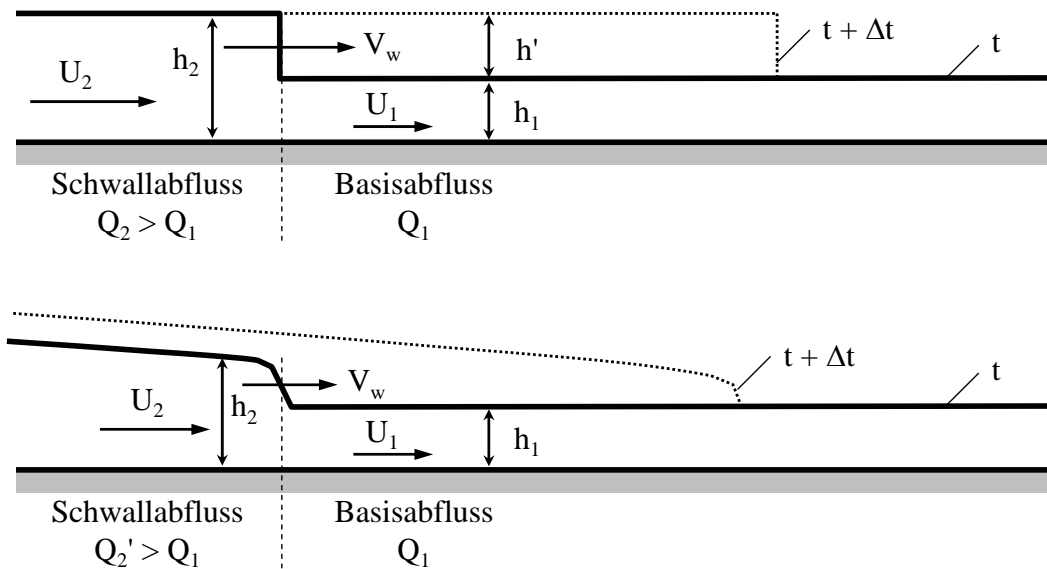


Abbildung 2: Schwallwelle von flussaufwärts im horizontalen, reibungsfreien Rechteckkanal und im geneigten Gerinne mit Fließwiderstand.

Grossmassstäbliche Rauheiten (GMR) und Buchten, wie sie in Modellversuchen untersucht wurden, vergrössern bei gleich bleibender Basisbreite B die Rauheit und bringen passive Rückhaltevolumen. Dadurch unterstreichen sie den diffusiven Charakter der Front einer Schwallwelle gemäss Abbildung 2, führen aber bei Erreichen von den stationären Abflussbedingungen auch zu höheren Wasserspiegeln infolge der erhöhten Rauheit.

3.2 Versuchsrinne und grossmassstäbliche Uferrauheiten

Modellversuche wurden in einer 38.3 m langen Rinne mit einem durchschnittlichen Gefälle von 1.14 ‰ durchgeführt. 40 verschiedene, idealisierte grossmassstäbliche Uferrauheiten (Abbildung 3 & 4) wurden zuerst unter stationären und dann unter instationären Abflussbedingungen (Schwallwellen mit steiler Front & Sunkwellen) untersucht. Die Schwall- und Sunkwellen wurden am oberen Ende des Kanals durch eine plötzliche Änderung des Abflusses verursacht. Die Verhältnisse von Q_{total} zu Q_b variierten zwischen 1.1 und 10.2.

Die grossmassstäblichen Rauheiten haben im Vergleich zum prismatischen Gerinne zwei Effekte:

- 1) Vertikale Mischschichten und Rezirkulationszellen, sowie Wirbelzonen verursachen Energieverluste, zusätzlich zur Wandreibung.
- 2) Die im Modell untersuchten Buchten sind ständig benetzt und führen bei ansteigendem Wasserspiegel im instationären Versuch zu einer passiven Retention.

Die vorherrschenden Abflussbedingungen während der Versuche waren strömend mit Froudezahlen im Bereich von 0.3 bis 0.7. Die Versuche wurden mit unbeweglicher Sohle durchgeführt.

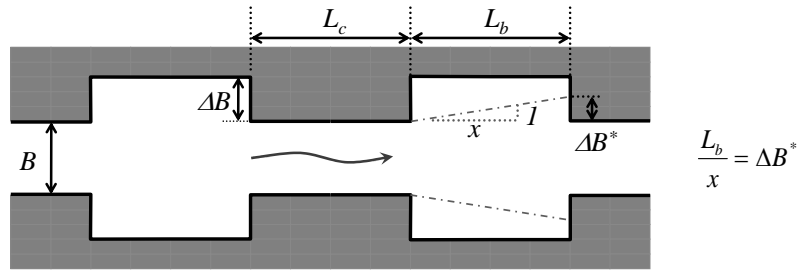


Abbildung 3: Definition der geometrischen Parameter der grossmassstäblichen Rauheiten der Ufer und des Modells zur Bestimmung des Fließwiderstandsbeiwertes.

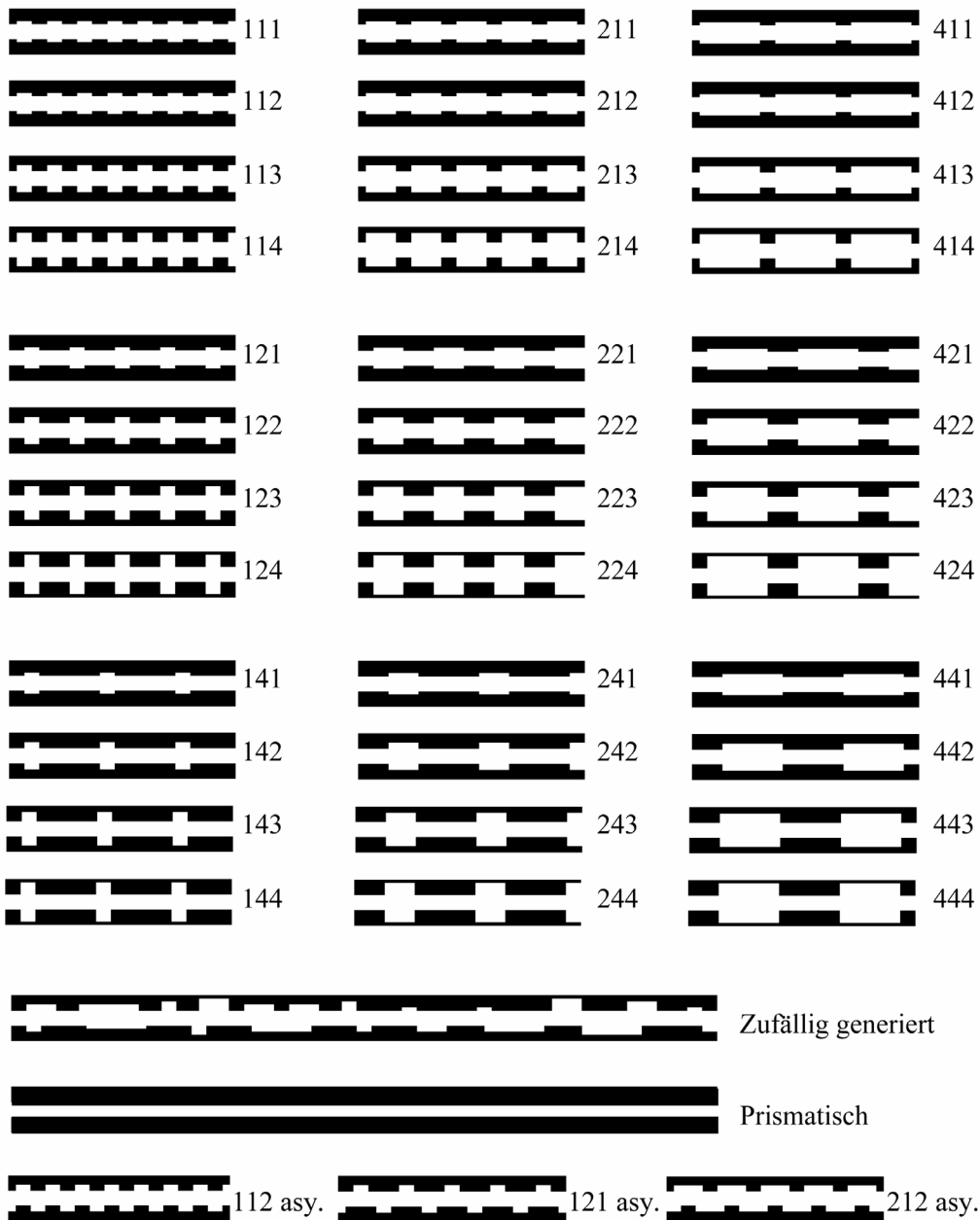


Abbildung 4: Untersuchte Geometrien (Draufsicht) der grossmassstäblichen Uferrauheiten. Variable Parameter sind die Buchtenlänge L_b und deren Abstand L_c sowie die Tiefe ΔB . Die Basisbreite $B = 0.5 \text{ m}$ ist konstant.

3.3 Phase 1: Bestimmung der grossmassstäbliche Uferrauheiten

Unter der Annahme, dass die grossmassstäblichen Rauheiten wie die Wandreibung einen zusätzlichen linearen Energieverlust erzeugen, konnte die Uferrauheit verursacht durch die Geometrie mittels Staukurvenberechnungen bestimmt werden („inverse roughness modelling“). Mit zunehmendem Abfluss nimmt auch die Abflusstiefen und somit der Einfluss der Wandrauheit, inklusive der grossmassstäblichen Rauheiten, zu. Die Rauheit der getesteten Geometrien ist in Abbildung 6 am Beispiel des Chezy-Beiwertes der Wand C_w gezeigt wobei dieser Wert den Effekt der grossmassstäblichen Rauheiten einschliesst. Ein hoher Chezy-Wert charakterisiert eine kleine Rauheit.

Es zeigt sich, dass die „Störung“ der prismatischen Ufer die Rauheit dieses Bereichs signifikant erhöht ($C_{w,prism} - C_{w,143} = 39 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1}$) was sich bei zunehmendem Verhältnis h/B auf den Fließwiderstand auswirkt. Die verschiedenen Geometrien mit GMR hingegen liegen näher beisammen ($C_{w,143} - C_{w,212} = 19 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1}$). Die zufällig generierte Geometrie weist einen Chezy-Beiwert bezüglich der Wand von $C_{w,zuf.} = 27.4 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1}$ auf und liegt somit in etwa in der Mitte der verschiedenen Geometrien.

Anhand der Versuche mit verschiedenen Abflüssen konnten Fließwiderstandsgesetze entwickelt werden, die zur Abschätzung des Einflusses der GMR der Ufer dienen. Sie basieren auf der Hypothese, dass der totale Fließwiderstandsbeiwert eines Querschnittes f_m wie folgt aufgeteilt werden kann:

$$f_m = f_{prism} + f_{GMR} \quad (2)$$

f_{prism} beschreibt den Anteil aller Effekte am Fließwiderstand bezüglich des Querschnitts, wie z.B. auch Bettformen, jedoch **ohne** GMR der Ufer. Dieser kann mit allgemein bekannten Fließwiderstandsgesetzen bestimmt werden (z.B. Strickler). f_{GMR} ist der **zusätzliche** Anteil und dient der Berücksichtigung des Fließwiderstandes durch die grossmassstäblichen Uferrauheiten. Die Berechnung sämtlicher hydraulischer Grössen bezieht sich auf die Basisbreite B (Abbildung 3). Zur besseren physikalischen Beschreibung der Rauheit wurden zudem die Geometrien unter der Berücksichtigung des Verhältnisses $\Delta B/L_b$ in drei Fälle unterschieden (Abbildung 5):

- $\Delta B/L_b < 0.1$: „Wiederanliegende Buchtenströmung“
- $0.15 < \Delta B/L_b < 0.6$: „Langgezogene Rotationsströmung in Bucht (2 Zellen)“
- $\Delta B/L_b \cong 0.8$: „Kreisförmige Rotationsströmung in Bucht (1 Zelle)“

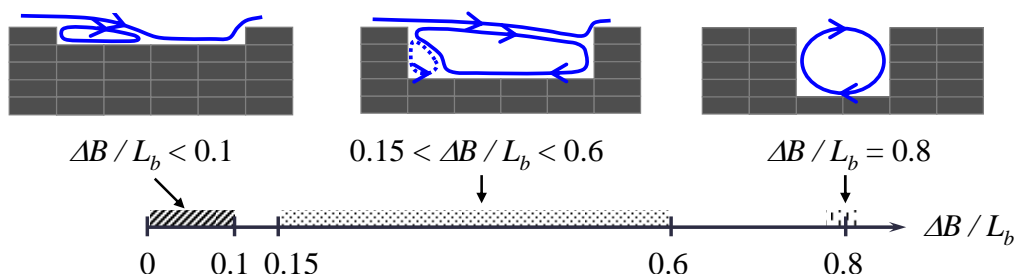


Abbildung 5: Aufteilung der Geometrien in Fliesstypen unter Berücksichtigung von $\Delta B/L_b$.

Die mit den systematischen Versuchen abgedeckte Bandbreite der Versuche ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Zwischenbereiche $0.10 < \Delta B/L_b < 0.15$ und $0.60 < \Delta B/L_b < 0.75$ können in guter Näherung dem Bereich der „Langgezogenen

Rotationsströmung“ zugeordnet werden. Der Bereich von $0.75 < \Delta B/L_b < 1.0$ ist der „Kreisförmigen Rotationsströmung“ zugeordnet.

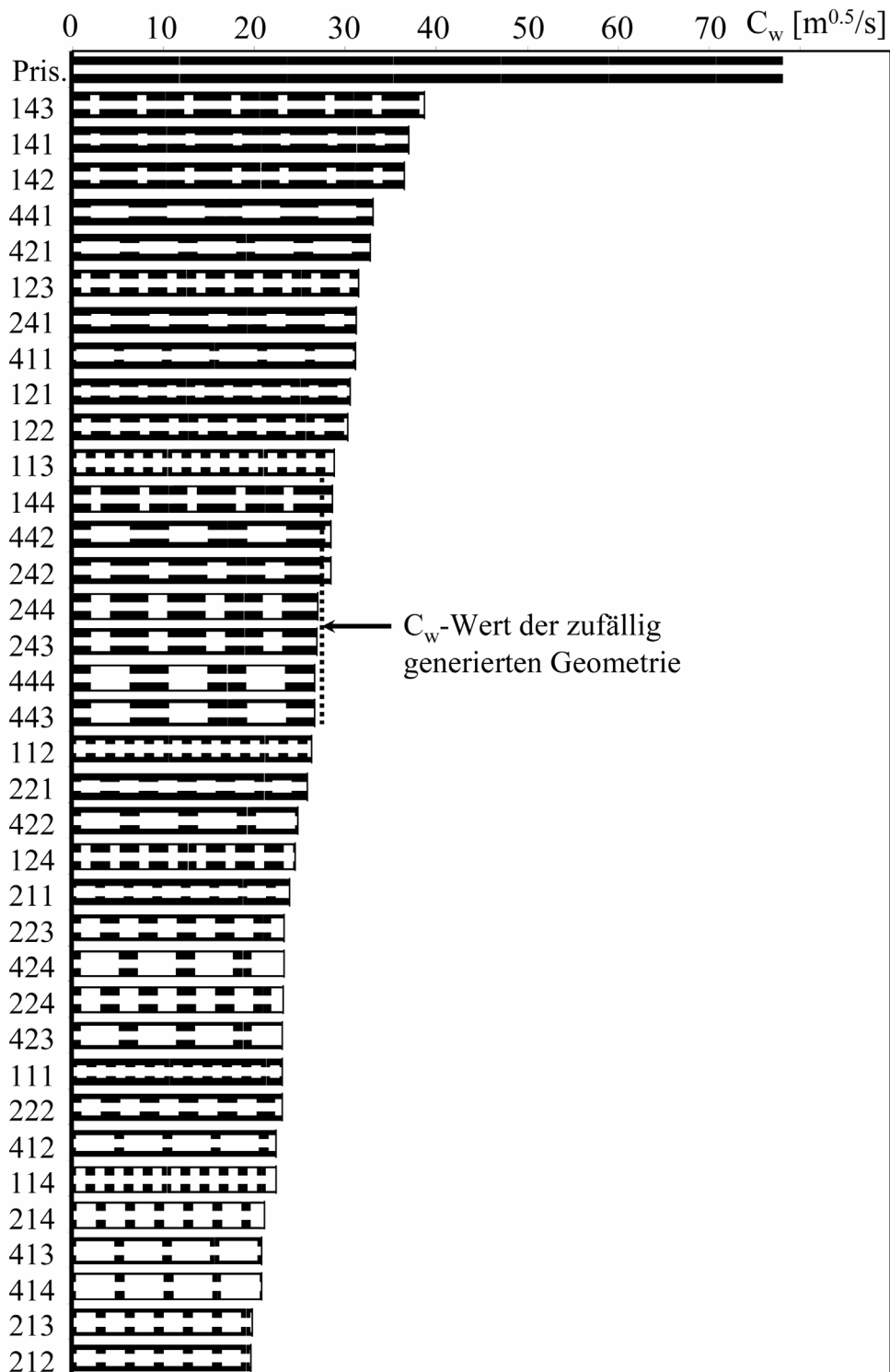


Abbildung 6: Chezy-Beiwert C_w der verschiedenen Geometrien bezogen auf die Wand (Effekt der grossmassstäblichen Rauheiten mitberücksichtigt). Der Beiwert entspricht dem grössten untersuchten Abfluss, und bezieht sich auf ein Verhältnis Fliesstiefe zu Basisbreite $h/B \cong 0.6-0.7$.

Die auf Grund der Versuche erhaltenen empirischen Formeln und deren Anwendungsbereich für die 3 Fliesstypen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Formel (3) und Formel (4) basieren auf einem konzeptuellen Modell welches das Kräftegleichgewicht mittels eines Widerstandsbeiwertes C_d (drag coefficient) berücksichtigt. Formel (5) wurde mittels der Optimierung der Konstanten und der Exponenten eines Potenzgesetzes gefunden.

Fliesstyp	Formel	Anwendungsbereich
Wiederanlegende Buchtenströmung	Konzeptuelles Modell basierend auf C_d :	$\Delta B / L_b \leq 0.1$ $R_H/B < \sim 0.25$
	$f_{GMR,wa} = C_d \frac{8R_h \Delta B}{B(L_b + L_c)}$ (3)	$12 < (L_b + L_c)/R_h < 65$ $12 < (L_b + L_c)/\Delta B < 40$ $\sim 1 < (L_b + L_c)/L_c < \sim 5$
Langgezogene Rotationsströmung	Konzeptuelles Modell basierend auf C_d :	$0.1 \leq \Delta B / L_b \leq 0.75$ $R_H/B < \sim 0.25$
	$f_{GMR,lg} = C_d \frac{8R_h \Delta B^*}{B(L_b + L_c)}$ (4a)	$9 < (L_b + L_c)/R_h < 67$
	$\Delta B^* = \min(\Delta B ; (L_b / x))$ (4b)	$3.3 < (L_b + L_c)/\Delta B < 25$
	$x = \left(\frac{150'000}{Re} + 4.5 \right) \left(\frac{L_b}{\Delta B} \right)^{0.18}$ (4c)	$2 < (L_b + L_c)/L_b < 5$ $\sim 1 < (L_b + L_c)/L_c < \sim 5$
Kreisförmige Rotationsströmung	Von Potenzgesetz:	$0.75 \leq \Delta B / L_b \leq 1.0$ $R_H/B < \sim 0.25$
	$\sqrt{f_{GMR,kf}} = 5 \cdot \left(\frac{L_b + L_c}{R_h} \right)^{1/3}$ (5)	$B \cong L_b$ $\sim 1 < (L_b + L_c)/L_c < 2$

Table 1: Formeln zur Berechnung des zusätzlichen Fließwiderstandsbeiwertes f_{GMR} . Für $R_H/B < 0.08$ sind keine experimentelle Daten vorhanden, mit abnehmendem Verhältnis nimmt der Wandeinfluss jedoch ab und ein Fehler betreffend f_{GMR} wird vernachlässigbar. Die Froudezahl variierte in den Versuchen von ca. 0.3 bis 0.7 und die Reibungsneigungen von 1‰ bis 5‰.

Der C_d -Wert von Formel (3) und Formel (4a) wurde basierend auf den Experimenten für rechtwinklige Buchten bestimmt und beträgt $C_d = 0.475$. Eine Anwendung derselben Formeln auf nicht überströmte Leitbahnen (Carvalho Pereira 2007) für den normal zirkulierenden Fliesstyp ergab einen Wert $C_d \cong 0.25$ (Abbildung 7).

Befinden sich die Rauheiten nur an einem Ufer, reduziert sich der Fließwiderstandsbeiwert f_{GMR} um 50%. Formel (4b) beschreibt eine empirisch bestimmte Grösse, die eine konzeptuelle Ausweitung der Strömung umfasst, so dass die effektive Fläche ΔB^* in Formel (4a) zum beobachteten Fließwiderstandsbeiwert führt.

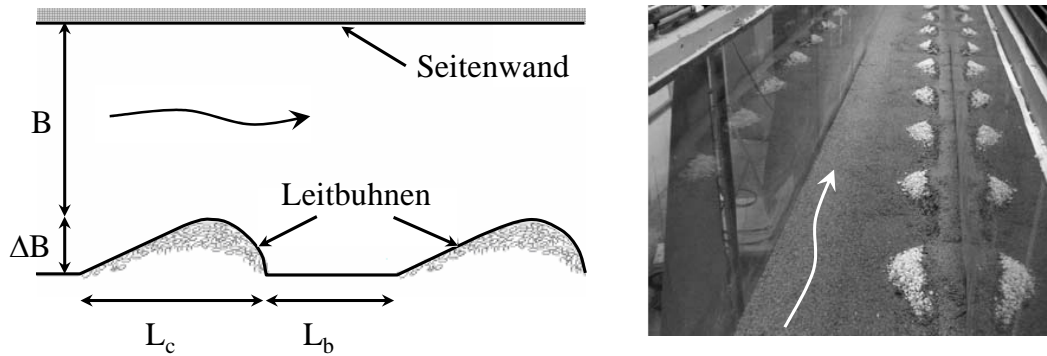


Abbildung 7: Charakteristiken der Leitbuhnen (nicht überströmt).

Mit Hilfe der Formeln (2) bis (5) kann der Einfluss von GMR der Ufer zur Berechnung folgender in der Hydraulik relevanten Grössen berücksichtigt werden:

- A) der Normalabflusstiefe
- B) des Reibungsgefälles in Staukurven

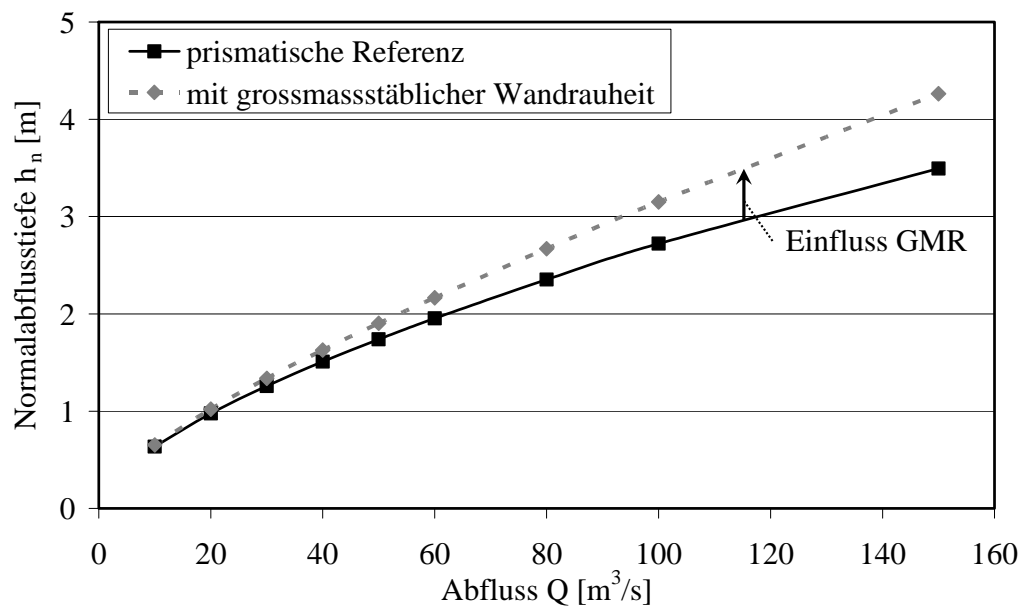
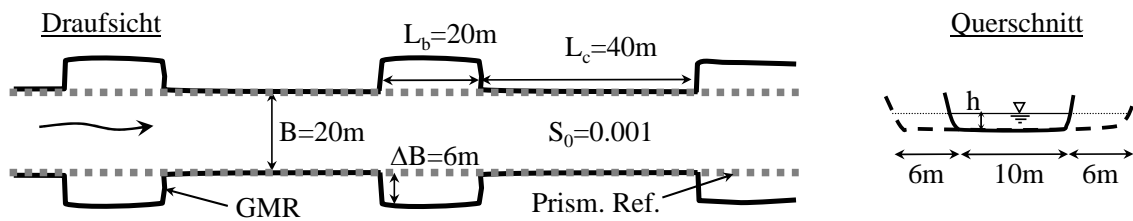


Abbildung 8: Berechnungsbeispiel für die Normalabflusstiefe unter Berücksichtigung von grossmassstäblichen Uferrauheiten.

Das Berechnungsbeispiel der Abbildung 8 weist geometrische Eigenschaften auf, die der langgezogenen Rotationsströmung in der Bucht entsprechen. Für eine gegebene Sohlenneigung S_0 und einen gegebenen Abfluss Q , kann die Normalabflusstiefe als

einzigste Unbekannte mit Hilfe der Darcy-Weisbach Formel (7) bestimmt werden. Wird zudem die Rauheit des Querschnittes mit Basisbreite B mit $K_{st,prism} = 35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ beschrieben, errechnet sich f_{prism} mit Formel (8).

$$S_0 = S_f = (f_{prism} + f_{GMR,lg}) \cdot \frac{1}{4R_h} \left(\frac{Q}{B \cdot h} \right)^2 \quad (7)$$

$$f_{prism} = \frac{8g}{K_{st,prism}^2 \cdot R_h^{1/3}} \quad (8)$$

Abbildung 8 fasst die in der prismatischen Referenzkonfiguration und unter Berücksichtigung der GMR berechneten Normalabflusstiefen zusammen. Der Unterschied in der Normalabflusstiefe gewinnt erwartungsgemäss mit zunehmendem Verhältnis h/B an Bedeutung.

3.4 Phase 2: Bestimmung der Verformung und Verminderung von Schwallwellen

In der zweiten Modellversuchsphase wurden Schwallwellen mit steiler Front im prismatischen Gerinne und in der Rinne mit GMR getestet. Folgende Aussagen können gemacht werden.

- Die Höhe der Schwallwellenfront h' nimmt exponentiell mit der Distanz ab. Dieser Effekt wird durch GMR der Ufer verstärkt. Nach der Wellenfront steigt der Wasserspiegel im Wellenkörper weiter kontinuierlich an und erreicht, infolge der erhöhten Uferauheit und der Tatsache dass die Basisbreite B nicht erhöht wurde, einen Wert, der über jenem des prismatische Gerinnes liegt.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit V_w der Schwallwellenfront wird mit zunehmendem Fließwiderstandsbeiwert reduziert. Die Theorie für prismatische Gerinne ist nicht mehr anwendbar.
- Die asymmetrischen Geometrien verhalten sich ähnlich wie die entsprechenden symmetrischen Geometrien und die zufällig generierte Geometrie liegt im Bereich der Geometrie 222 (Abbildung 4).

Ein weiteres Resultat der Analyse der Versuche ist, dass mehrere zufällig ausgewählte, getestete Schwallwellen im numerischen 1-dimensionalen Modell mit recht guter Übereinstimmung nachgerechnet werden konnten. Ausgangslage war ein einfacher Rechtecksquerschnitt mit Basisbreite B . Die 1-dimensionalen Gleichungen von de Saint Venant wurden dazu wie folgt angepasst:

- *Dynamische Gleichung*: Berücksichtigung der grossmassstäblichen Rauheiten in der Berechnung des Reibungsgefälles unter Beibehaltung der Gewässerbreite B .
- *Kontinuitätsgleichung*: Anpassung der Gewässerbreite zur Berücksichtigung der passiven Retention. Die Gewässerbreite in der Kontinuitätsgleichung ist $B' = B + \Delta S / \Delta L$, wobei $\Delta S / \Delta L$ die zusätzliche, benetzte Fläche ΔS pro Gewässerdistanz ΔL darstellt. Im Modellversuch beträgt $B' = B + 2\Delta B L_b / (L_b + L_c)$.

Die Berechnungen lassen den Schluss zu, dass die Wirkung flussbaulicher Massnahmen wie grossmassstäbliche Uferauheiten auf die Abflüsse und Wasserspiegel für ein

spezifisches Gewässer unter Verwendung der empirischen Widerstandsbeiwerte und einer angepassten Gewässerbreite in der Kontinuitätsgleichung im 1-dimensionalen Modell gut abgeschätzt werden können.

4. Schlussfolgerungen

Die Ausbreitung sowie die Abschwächung einer (Schwall)welle hängt von der Morphologie des Gewässers (Geometrie, Rauheit und evt. passiver Retention) sowie von zentralen- und produktionspezifischen Parametern der Speicherkraftwerke ab. Die Zeit Δt in der Größenordnung von 15 s bis 180 s, in welcher der Abfluss an der Rückgabestelle von Q_b auf Q_{total} steigt, hat einen Einfluss auf den Anstieg unmittelbar unterhalb der Zentrale, weiter flussabwärts spielt dieser Parameter aber eine untergeordnete Rolle. Die Dauer der Belastung T , die mittlere Neigung S_0 sowie das Verhältnis Q_{total}/Q_b hingegen spielen eine massgebende Rolle, da sie darüber entscheiden, ob stationäre Abflussbedingungen ($dh/dt = 0$) vor dem Abstellen der Turbinen erreicht werden. Je steiler und je glatter das Gewässer, desto schneller werden für eine gegebene Breite B und ein gegebenes Verhältnis Q_{total}/Q_b diese Verhältnisse erreicht. Ist dies der Fall bildet sich ein Wellenplateau mit einem Abfluss von Q_{total} , welches nach dem Abstellen der Turbinen zuerst abgebaut werden muss. Dies wirkt sich in Bezug auf Fließretentionsvorgänge ungünstig aus.

Die Modellversuche mit stationären Abflüssen erlaubten die Bestimmung von drei empirische Formeln zur Abschätzung des Einflusses von Uferformrauheiten auf den Fließwiderstandsbeiwert eines Querschnittes. Der Einfluss auf das Reibungsgefälle nimmt mit zunehmendem Verhältnis h/B respektive R_h/B zu. Für die Anwendung der Formeln wird in verschiedene Fliesstypen unterschieden. Zwei der drei Formeln basieren auf einem konzeptuellen Modell welches das Kräftegleichgewicht und einen Widerstandsbeiwert C_d (drag coefficient) berücksichtigt. Die Modellversuche mit instationären Abflüssen beziehen sich auf die Abflussvorgänge unterhalb von Wasserrückgaben. In diesem Bereich ist der Wasserspiegelanstieg charakterisiert durch einen schnellen Anstieg (Wellenfront) gefolgt von einem progressiveren Anstieg (Wellenkörper). Die Höhe der Wellenfront nimmt im Fließverlauf unter dem Einfluss der Sohlenneigung und dem Fließwiderstand exponentiell ab wobei die Abnahme durch grossmassstäbliche Rauheiten und Buchten verstärkt wird.

Betreffend morphologischer Massnahmen in Schwall/Sunk Strecken sind folgende Überlegungen zu berücksichtigen. Vorteile betreffen die Strömungsvielfalt, strömungsgeschützte Zonen als Fischrefugien, die Diversifizierung des Substrats, die Aufwertung des Umlandes und generell die Zunahme von potentiell interessanten Lebensräumen. Morphologische Massnahmen, die Vergleich zum kanalisierten Gerinne zudem die benetzte Breite des durchflossenen Querschnittes bei Sunk erhöhen sind grundsätzlich interessant, da bei gleicher Rauheit, Sohlenneigung und gleichem Schwall/Sunk Verhältnis die Wasserspiegelschwankung abnimmt. Morphologische Massnahmen in geschiebeführenden Flüssen sind aber auch verbunden mit Flachuferbereichen, welche bei Schwall/Sunk die Wasserwechselzone bilden und in welcher bei raschem Rückgang des Wasserspiegels die Gefahr von strandenden Organismen erhöht ist. Die Wasserwechselzone nimmt mit kleiner werdendem Schwall/Sunk-Verhältnis ab.

Morphologische Massnahmen in Form von ständig benetzten, seitlichen Buchten wie im Modell getestet erhöhen die passive Retention sowie die Rauheit. In typischen Quer-

schnitten mit einem kleinen Verhältnis h/B dominiert dabei die passive Retention den Effekt des kaum erhöhten Fließwiderstandes verursacht durch die Rauheit der Ufer deutlich. Um die passive Retention auch effektiv zu erreichen und gleichzeitig die Gefahr des Strandens zu verhindern, müssten die grossmassstäblichen Rauheiten so ausgestaltet sein, dass die zusätzlichen Flächen auch bei Sunk benetzt sind und die wechselnd benetzten Flächen geringe Ausmasse einnehmen.

Welche Wirkung hinsichtlich Fließretention mit morphologischen Massnahmen erreicht werden kann hängt vom Gewässer ab. Für kurze Turbiniersequenzen kann die lokale Erhöhung der Rauheit sowie die passive Retention interessant sein, da das Erreichen der stationären Abflussbedingungen an der Rückgabestelle verzögert und dadurch die Fließretention begünstigt wird. Für lange Turbinierzeiten, wie sie im schweizerischen Alpenraum im Normalfall vorherrschen, kann das Schwall/Sunk-Verhältnis Q_{max}/Q_{min} und somit die täglichen Wasserspiegelschwankungen jedoch nur durch Rückhaltebecken unterhalb der Zentralen (Wickenhäuser et al. 2005) oder am effizientesten durch Mehrzweckbecken direkt im Fluss (Heller et al. 2007) massgebend beeinflusst werden. Der Gewinn der morphologischen Massnahmen betrifft in diesem Fall hauptsächlich die Struktur- und Strömungsvielfalt.

Bibliographie

- Baumann P., Klaus I.** (2003). *Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes - Ergebnisse einer Literaturstudie*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Switzerland.
- Carvalho Pereira S.** (2007). *Ouvrages de protection de berges sur les rivières*. Travail de Master of Advanced Studies. Rapport LCH-EPFL.
- Favre H.** (1935). *Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts*, Dunod, Paris.
- Heller Ph., Pellaud M., Bollaert E., Schleiss A., Schlaepfer R.** (2007). *River Rehabilitation through a Multi-purpose Reservoir*, Proceedings of the 32nd Congress of IAHR, Special session 01 (SS01-01-0), Venice, Italy, 1.-6. July 2007, CD-Rom, 2007
- Henderson F. M.** (1966). *Open Channel Flow*, Macmillan, New York, USA.
- Meile T.** (2006). *Schwall und Sunk in Fliessgewässern*. Eawag News (61d), 28-29.
- Meile T.** (2007). *Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel*. Thèse N° 3952, EPFL, Lausanne.
- Meile T., Fette M., Baumann P.** (2005). *Synthesebericht Schwall/Sunk*. Publikation des Rhone-Thur Projektes, Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ, pdf auf www.rivermanagement.ch.
- Meile T., Schleiss A., Boillat J.-L.** (2005c). *Entwicklung des Abflussregime des Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts*. Wasser, energie, luft – eau, énergie, air, 97(5/6), 133-142.
- Pfaundler M., Keusen M.** (2007). *Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz*. Umwelt-Wissen Nr. 0712. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Schälchli U., Eberstaller J., Moritz C., Schmutz S.** (2003). *Notwendige und wünschbare Schwallreduktion im Alpenrhein*. Bericht im Auftrag der IRKA Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie.
- Stranner H.** (1996). *Schwallwellen im Unterwasser von Spitzenkraftwerken und deren Reduktion durch flussbauliche Massnahmen*. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft N°20, Technische Universität Graz, Austria.
- VAW-LCH** (2006). *Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk, Eine Standortbestimmung*. VAW 4232, LCH 05-2006.
- Wickenhäuser M., Hauenstein W., Minor H.-E.** (2005). *Massnahmen zur Schwallspitzenreduktion und deren Auswirkungen*. Wasser, Energie, Luft- eau, énergie, air, 97(1/2): 29-38.

Notationen

GMR	Abk. für grossmassstäbliche Rauheit	Δt	Dauer um vom Basis- zum Totalabfluss an der Rückgabestelle zu gelangen
B	Kanalbasisbreite ohne Buchten	T	Dauer des Turbinierimpulses
h	Abflusstiefe	V_w	Fortbreitungsgeschwindigkeit der Front
h'	Höhe der Wellenfront sofern erkennbar	Re	Reynolds-Zahl $Re=R_h U/v$
Q	Abfluss	<i>Indizes und Exponenten</i>	
U	Mittlere Fliessgeschwindigkeit bez. B	m	bez. Gesamtquerschnitt (Basisbreite)
R_h	hydraulischer Radius	prism	bez. Gerinne/Kanal ohne GMR
L_b	Länge der GMR	MR	bez. GMR
L_c	Abstand zwischen zwei GMR	b	bez. Basisabfluss an Rückgabestelle
ΔB	seitliche Ausdehnung der der GMR	total	bez. Basisabfluss + Turbinenabfluss an Rückgabestelle
C_w	Chezy Koeffizient ($m^{1/2}/s$) bezüglich der Wand/Ufer inklusive Effekt GMR	min	bez. täglichem Minimalabfluss
C_d	Widerstandsbeiwert (drag coefficient)	max	bez. täglichem Maximalabfluss
K_{st}	Strickler Beiwert	mittel	bez. täglichem Mittelabfluss
f	Fliesswiderstandsbeiwert (Darcy-Weisb.)		

Verdankung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Rhone-Thur Projekts durchgeführt und mitfinanziert durch das Bundesamt für Wasserwirtschaft und Geologie BWG (heute Bundesamt für Umwelt BAFU).

Adresse der Autoren

Tobias Meile, Dr. Jean-Louis Boillat und Prof. Dr. Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18
1015 Lausanne, Schweiz
+41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
tobias.meile@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

Influence of shallow reservoir geometry on the flow pattern and sedimentation process by suspended sediments

Sameh A. Kantoush, Jean-Louis Boillat, Erik Bollaert and Anton Schleiss

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche sur la sédimentation de réservoirs à faible profondeur, en particulier les sédiments en suspension, les paramètres suivants ont été étudiés: l'influence de la géométrie du réservoir sur le transport des sédiments, leur écoulement et les dépôts des ces derniers. Plusieurs géométries de réservoirs à faible profondeur ont été étudiées afin de déterminer l'effet de ces géométries sur la recirculation de l'écoulement dans le réservoir. Les résultats obtenus par ces essais permettent de comprendre le comportement de l'écoulement et le processus de sédimentation. La prévision du comportement des sédiments se base sur l'estimation du comportement du flot. Les résultats sont très sensibles aux conditions de bords et aux caractéristiques géométriques du réservoir. En dépit de la configuration symétrique, l'écoulement observé et les dépositions des sédiments sont asymétriques. L'influence des sédiments en suspension dans la formation de l'écoulement et des formes du lit du réservoir est similaire pour toutes les géométries testées. Au début des tests, les zones principales des dépôts des sédiments ainsi que les concentrations maximales sont observées le long du jet principal, où la vitesse est maximale. Le champ d'écoulement est initialement stable avec un lit lisse ou avec une couche relativement fine de dépôts. Cependant, après quelque temps, des ondulations du lit se développent sous l'effet du jet principal. Ces ondulations ont des amplitudes d'environ 15% de l'hauteur de l'écoulement et sont capables de modifier les conditions de l'écoulement. Majeur est le facteur de forme géométrique du réservoir et plus les dépôts des sédiments se répartissent uniformément sur la surface totale du réservoir. De plus, l'évolution temporelle des dépositions a pu être étudiée pour diverses géométries du réservoir. La capacité de rétention des sédiments par les réservoirs (TE) est calculée en utilisant deux approches différentes. Les résultats montrent des corrélations différentes pour la capacité de rétention des sédiments selon la largeur du réservoir rectangulaire. Le volume des sédiments atteint le 50% du volume total du réservoir après 18 heures. Le réservoir atteint l'équilibre après 16 heures, au moment où l'efficacité de relâchement résulte du 100%.

Abstract

In the framework of a research project on sedimentation of shallow reservoirs by suspended load, the influence of reservoir geometry on sediment transport, flow and deposition patterns are being studied. Recirculating flows in shallow rectangular reservoir with different shape were investigated in order to study the effect of geometry. The results help to understand the flow mechanism and the sediment exchange process. The prediction of sediment behavior lies in the prediction of flow behavior and the results are very sensitive to the geometry and the boundary conditions. In spite of the symmetric setup, an asymmetric flow and sediment pattern developed. The deposition pattern is obviously strongly influenced by the inlet jet deviation and, in turn, material deposits are able to change later the pattern of the flow structure. The flow pattern was stable, with smooth or relatively low roughness over the entire bed. However, after some time, ripples developed underneath the main jet, with thicknesses of about 0.15 times the flow depth. These were able to change the flow pattern. The higher the shape factor of the reservoir, the more uniform were the depositions over the entire surface. Furthermore, the time evolution of deposition patterns with different reservoir geometries could be assessed. Sediments Trap Efficiency (TE) in the reservoirs was calculated by using two different approaches. The results show different correlations for trapping efficiency with variable rectangular widths. The volume of the deposited sediments reached 50% of the total reservoir volume after 18 hours. The reservoir reaches to the equilibrium after 16.0 hours at which the suspended sediment release efficiency reaches 100%.

1. Introduction

The silting-up of reservoirs is a very complex process. Shear flow over a mobile bed induces sediment transport and the generation of bed forms. The interaction between the flow and the bed usually produces different types of regular patterns characterized by a wide range of sizes and shapes (dunes, ripples, antidunes, etc.). In turn both, sediment transport and bed forms, influence the flow. The importance of studying the development and evolution of these regular patterns arises because the generated bed forms can increase the flow resistance. A mass of sediments is kept in suspension above a bed by the eddies of flow turbulence. By way of contrast, bedload grains move by rolling and saltation on the bed, with their immersed weight in dynamic equilibrium with the solid normal stress transmitted by the action of the fluid shear, Bagnold (1973). Applied to individual grains the concept of suspension is necessarily statistical, because of continuous exchange between bed load and the overlying turbulent flow. However, a steady state exists with respect to a suspended mass in a steady, uniform flow. Over a sufficiently long period of time the measured mass will itself be constant whereas the constituent grains may continuously be exchanged between bed, bedload and suspended load. A state of dynamic equilibrium thus exists. Predicting the sediment transport rate and a better understanding of the processes of bed form generation depend on whether and how the sediment influences the flow characteristics Crowe (1993). Much debate has arisen concerning the influence of suspended sediment on the von Kármán coefficient κ , with researchers proposing either a reduction in κ with increasing sediment suspension [e.g., Vanoni (1946, 1953); Einstein & Chien (1955)] or maintaining κ as a constant but using an appropriate wake coefficient according to the "law of wake" [Itakura & Kishi (1980); Coleman (1981)]. Recent studies have

challenged the assumption that κ is constant and the outer wake region is most affected by suspended sediment Lyn (1992). Furthermore, Gust & Southard (1983) believe that κ is reduced from its clear water value, even in the case of weak bedload transport without suspended sediment. Recent work concerning two-phase flows in pipes and wind tunnels has shown that grains may enhance turbulence production when larger than the micro scale of turbulence or attenuate turbulence when the grains are small enough to be enclosed within the turbulent eddies [Gore & Crowe (1989); Hetsroni (1989); Kulick (1994)]. When large grains are added to the flow, fluid turbulence may increase [e.g., Mueller (1973); Gore & Crowe (1989); Hetsroni (1989)] or remain relatively unchanged [Rayan (1980); Lyn (1992)]. Other researchers have found that adding to the flow fine grained sediment may cause turbulence attenuation [Xingkui & Ning (1989); Kulick (1994)]. In addition, factors including the sediment concentration, grain size sorting, and sediment-to-fluid density ratio have also been shown to influence turbulence modulation Gore & Crowe (1989). However, it has also been suggested that the ratio between the response time of a particle within a flow to the scale of the turbulence may influence both turbulence attenuation and enhancement in the carrier fluid Elghobashi (1994). It is clear from the aforementioned research that the full understanding of the interaction between turbulence and sediment transport is still missing. Flow separation and reattachment due to sudden changes in geometry in internal flow occur in many engineering applications as in shallow open channels, sewer systems (storage tank sedimentation), groin fields and shallow reservoirs. The location of reattachment zone and the occurring flow structures play an important role for the properties of the recirculation region. The reattachment zone directly forms the initial conditions for the recovery process downstream. The separation zone or the flow downstream of the reattachment can be predicted only if the reattachment length and structure in the reattachment zone are correctly known. Turbulent flows are considered as shallow in the sense that the depth of the flow is small compared with its horizontal length scale. The effect of friction on the physical process of mixing in the recirculating flow was studied with laboratory experiments by Babarutsi, Ganoulis & Chu, (1989). In an experimental study on groin fields Uijtewaal et al. (2001) pointed out a qualitative difference between mixing layer vortex and vortex shedding. The later phenomenon is largest in scale and is associated to the presence of a secondary recirculation cell. The mixing layer vortices are the result of the lateral shear. Experimental observations of flows through a symmetric channel expansion are given by Durst et al. (1974), Cherdron et al. (1978), John (1984) and Sobey (1985). The flow across an axisymmetric sudden expansion has all the complexities of an internally separating and reattaching flow. The large features of the axisymmetric sudden expansion flow, both laminar and turbulent, are fairly well known through flow visualizations and some quantitative studies (Durst et al. (1974), Fearn et al. (1990), and Cherdron et al. (1978)). A significant conclusion of these studies is that even the geometry is symmetric, asymmetric flows develop under certain Reynolds number and geometric conditions. At low Reynolds numbers the flow remains symmetric with separation regions of equal length at each side of the expanding channel. The length of the separation regions increases with increasing Reynolds number. At higher Reynolds numbers, however, separation regions of unequal length develop and the asymmetry remains in the flow, even up to turbulent flow conditions.

2. Objectives

This study focuses on the sedimentation of shallow reservoirs by suspended sediments and the objective of the experiments is to gain insight into the physical process behind the sedimentation of shallow reservoirs governed by suspended sediments. Moreover, beside the effect of the geometry on the flow and sediment deposition pattern, the study is aiming at a better understanding of the mechanism governing the sediment exchange process between the jet entering the reservoir and the associated turbulence structures. The influence of the geometry of a rectangular reservoir on the trap efficiency and bed form formation as well as its evolution is presented. Furthermore, the effect of the suspended sediments on flow and sediments patterns is illustrated. These experiments are part of test series prepared to investigate the ideal reservoir geometry, minimizing the settlement of suspended sediments. Finally, the major physical processes responsible for the observed phenomena (asymmetric flow patterns in symmetric geometry) are analyzed.

3. Physical Modeling

3.1 Experimental setup

The experimental setup (Figure 1 a & b) consists of a rectangular inlet channel 0.25 m wide and 1.0 m long, a rectangular shallow basin with inner dimensions of 6.0 m length and 4.0 m width, and a 0.25 m wide and 1.0 m long rectangular outlet channel. The water level in the basin is controlled by a 0.25 m wide and 0.30 m high flap gate at the end of the outlet. The basin is 0.30 m deep and has a flat bottom. The walls and bottom are hydraulically smooth. Adjacent to the basin, a mixing tank is used to prepare the water-sediment mixture. Along the basin side walls, a 4.0 m long, movable, aluminum frame is mounted, which carries the measurement instruments. Several parameters were measured during every test, namely: 2D surface velocities, 3D velocities, thickness of deposited sediments, concentration of sediment inflow and outflow, water level in the basin, and discharge. Floating white polypropylene tracer particles are used to visualize the surface velocity field.

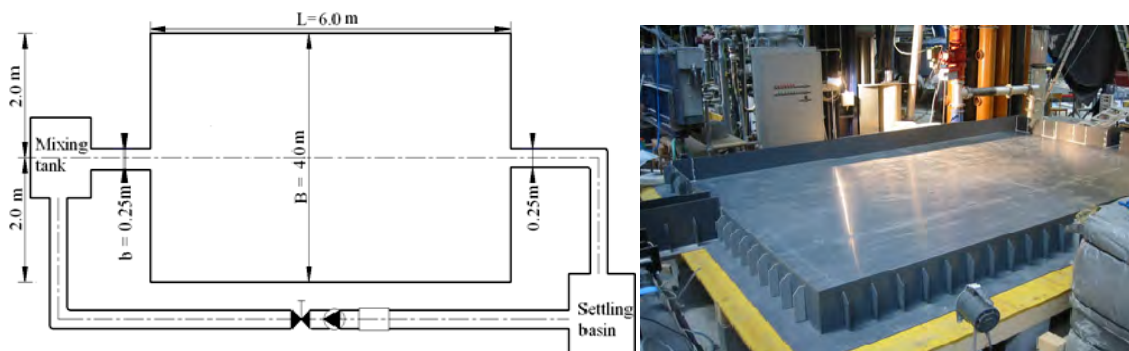


Figure 1: (a) Plan view of the reference experimental setup ($L = 6\text{ m}$, $B = 4\text{ m}$); (b) photograph, looking downstream.

Instantaneous velocity fields are obtained by a 1.3 megapixel digital camera connected to a computer and the PIV algorithm of FlowManager[®]. Adjacent to the reservoir, a mixing tank is used to prepare the water-sediments mixture. The mixing tank is equipped with a propeller type mixer to create a homogenous sediments concentration. The water-sediments mixture is supplied by gravity into the water-filled rectangular

basin. Suspended sediments are modeled by crushed walnut shells with a median grain size $d_{50}=50\mu\text{m}$ which is non cohesive. Several parameters were measured during every test; namely: 2D surface velocities, 3D velocities, thickness of deposited sediments, sediments concentration of inflow and outflow, water level in reservoir and discharge. Floating white polypropylene tracer particles with a 3.4 mm diameter, contrasting with dark bottom, are used to visualize the surface velocity field. Instantaneous velocity fields are obtained by a 1.3 Mpixel digital camera and the PIV algorithm of FlowManager. The bed level evolution was measured with a Miniature echo sounder (UWS). The sounder was mounted on a movable frame which allowing to scan the whole basin area.











Test No	B [m]	L [m]	$ER = B/b[-]$	$AR = L/B [-]$	$f = (A/P^2)*ER [-]$	Form
1,2,3,4	4.0	6.0	16	1.5	0.96	
7	3.0	6.0	12	2.0	0.67	
8	2.0	6.0	8	3.0	0.375	
9	1.0	6.0	4	6.0	0.122	
11	4.0	5.0	16	1.25	0.99	
12	4.0	4.0	16	1.0	1.0	
13	4.0	3.0	16	0.75	0.97	
14	4	6	8	1.5	0.95	
15	4	6	16	1.5	0.75	
16	4	6	12	1.5	1.71	

Table 1: Configurations of different test series and their geometrical characteristics: L and B are length and width, A the total surface area of the basin, P is the wetted perimeter of the length of the side walls, and ER and AR are the expansion and aspect ratios. Shape factor is defined as $f = (A/P^2)*ER$.

3.2 Test configurations

Automated measurement of suspended sediments is crucial to study the sediment transport. The short duration, high intensity flows that are responsible for a large fraction of sediment movement are best observed by continuous monitoring systems. For this purpose two sensors SOLITAX were installed at the inlet and outlet channels for online suspended sediment measurements. The measuring principle is based on a combined infrared absorption scattered light technique that measures the lowest turbidity values in accordance with DIN EN 27027 [Kantoush, (2006)]. The effect of

the basin geometry and sediment deposits on the degree of asymmetry of the separated flow was studied in detail. After filling the basin and having reached a stable flow state with the clear water. First LSPIV recording (Large-scale particle image velocimetry) has been performed during 3 minutes. Then a second phase, the water-sediment mixture was drained by gravity into the water-filled rectangular basin. The flow circulation pattern with suspended sediment inflow was examined every 30 minutes using LSPIV. After suspended sediments have deposited, the bathymetric measurements are performed. The geometrical parameters are defined in Table 1. The following parameters were kept constant for all configurations: discharge ($Q = 7.0$ l/s), sediment concentration ($C = 3.0$ g/l), water level at the outlet ($h = 0.2$ m), inlet and outlet channels dimensions (length $l = 1.0$ m and width $b = 0.25$ m).

4. Results

4.1 Observed flow patterns and features

Figure 2 shows an overview of the streamlines and behavior of large-scale coherent structures for two shapes with shape factors $f = (A/P^2) \cdot ER$ of 0.96 and 0.99 (see also Table 1). For $f \leq 0.96$, a plane jet issues from the narrow leading channel and enters straight into the first half-meter of the much wider basin. After jet issuance, the main flow tends to curve towards the right hand side over the next two meters, until it stagnates against the right wall as shown in Figure 2(a). The main flow separates from the right wall, inducing a zone of flow recirculation (1). A streamlines of vortices is shed from the stagnation point. After the jet touches the wall, a separation occurs and generates a large main stable eddy in the centre of the basin rotating counterclockwise with size L_{r3} and B_{r3} . When looking from the inflow toward the inflow, two small ‘triangular’ gyres are formed rotating clockwise in the upstream corners of the basin with dimensions L_{r1} and B_{r1} along the right corner and with dimensions L_{r2} and B_{r2} along the left corner. The deflected jet works as a vortex shedding region between the main eddy in the centre and the triangular one in the upstream right corner. Moreover, two mixing layers can be observed between the main flow and both eddies.

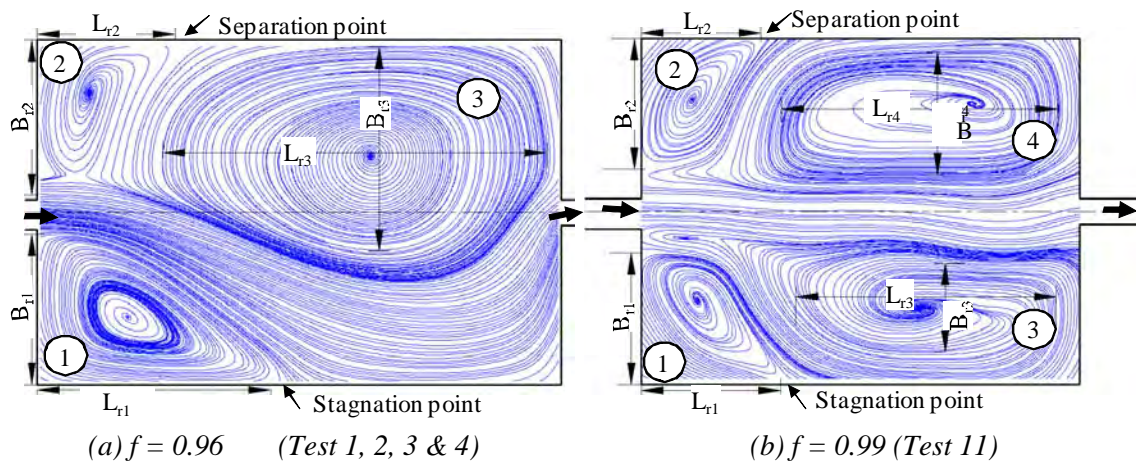


Figure 2: Time-averaged streamlines obtained by LSPIV measurements for clear water flow for two different basin geometries with shapes $f = (A/P^2) \cdot ER$ of 0.96 (left) and 0.99 (right). The geometrical parameters of the recirculation cells in the basin are L_{ri} , B_{ri} for gyres (1, 2, 3 & 4).

The jet seems to be attracted to one side of the basin (in the tests, always to the right side). After the flow has reached the left wall by the counterclockwise large circulation, a separation point forms (Figure 2(a)). The streamline of the large gyre is shed from the separation point and connects with the core gyre. A second vortex shedding zone in the reverse direction is generated between the main gyre and the small triangular clockwise eddy in the upstream left corner. The reverse flow jet, which is generated by the inertia of the main gyre, pushes the incoming jet aside and forms a shedding point between four features: main flow jet, reverse flow jet, large main gyre, right and left corner gyres. The jet preference for the right side is weak, since a stable mirror image of the flow pattern can easily be established by slightly disturbing the initial conditions. The stable asymmetric pattern, with a larger and smaller recirculation zone at the right and left corners, can be explained by a Coanda effect by which any perturbation of the flow field, pushing the main flow to one side of the basin, gives rise to larger velocities. Thus the asymmetry will naturally tend to be accentuated by this Coanda effect for more details [Kantoush, 2007]. By increasing the shape factor $f > 0.96$, the flow becomes more stable and symmetric, which will be explained in detail hereafter. Figure 2(b) shows the second flow behavior that developed with a shorter geometry length (Tests No 11, 12 & 13) and a hexagonal geometry (Test No 16). In that case, the flow became more stable and symmetric with four large vortices (4 regions in Figure 2(b)). By more increasing f to 0.97, the number of symmetric gyres is reduced to two (coupled) circulation cells along the centerline. The upstream corner vortices disappear completely. In conclusion, in tested axisymmetric rectangular configurations, the flow is symmetric if $f > 0.96$ and asymmetric if $f \leq 0.96$. Flow patterns, streamlines, and mean vorticities for all test series are compared in Figures 3 and 4. For all tested geometries, two typical behaviors were observed. The first is a stable asymmetric flow pattern with one long and one short separation zone for reduced basin widths B (Test No 11 in Table 1). The second is a symmetric flow pattern along the centerline with large scale vortices on both the right and left sides for reduced basin lengths and hexagonal geometries.

4.2 Asymmetric flow for geometry shape factor $f \leq 0.96$

Figure 3 (a) – (f) shows the flow behavior for various geometries with $f = 0.96, 0.67, 0.375, 0.122, 0.75$ and 0.95 , respectively. On the left side of the figure, the flow patterns are shown by the velocity vectors and magnitude. Of particular interest is the effect of the geometry on the flow field and the separation zone on both sides. In Figure 6(a) (see also Figure 2(a)), the flow has an asymmetric behavior, leading to a larger gyre size in the right upstream corner side than in the left side. The main gyre size is in accordance with the two corners gyres. The two corner gyres are in accordance with each other and alternatively change in size. Moreover, they control the size and location of the main gyre. By removing the upstream corners, as shown in Figure 3(e), the two corner gyres disappeared and only the core gyre is formed. No changes occurred by removing the downstream corners in the diamond geometry shape. The observed flow pattern in Figure 3(f) did not differ much from what was previously explained for Figure 3(e), except for the reduction in size of the center gyre and a downstream shifted separation and reattachment points. The size and locations of the three vortices are clearly visible by streamlines shown in the middle of Figures 3 (a), (b), (c), (d), (f) and (g). On the right side of the same figures, the mean vorticities of the flows are shown. The vorticity is defined as the curl of the velocity. In accordance with the flow patterns and streamlines, the high vorticity is concentrated at the curved jet entering from the inlet

channel and the right side corner. Figure 3(c), exhibits a relatively large area with strong vorticity. It reflects a large portion of flow stabilization due to width reduction. By reducing the basin width, the flow becomes more homogenous and the transversal vorticity increases. Moreover, no stagnant water is observed in the centre of the gyres shown in Figure 3(c) & (d).

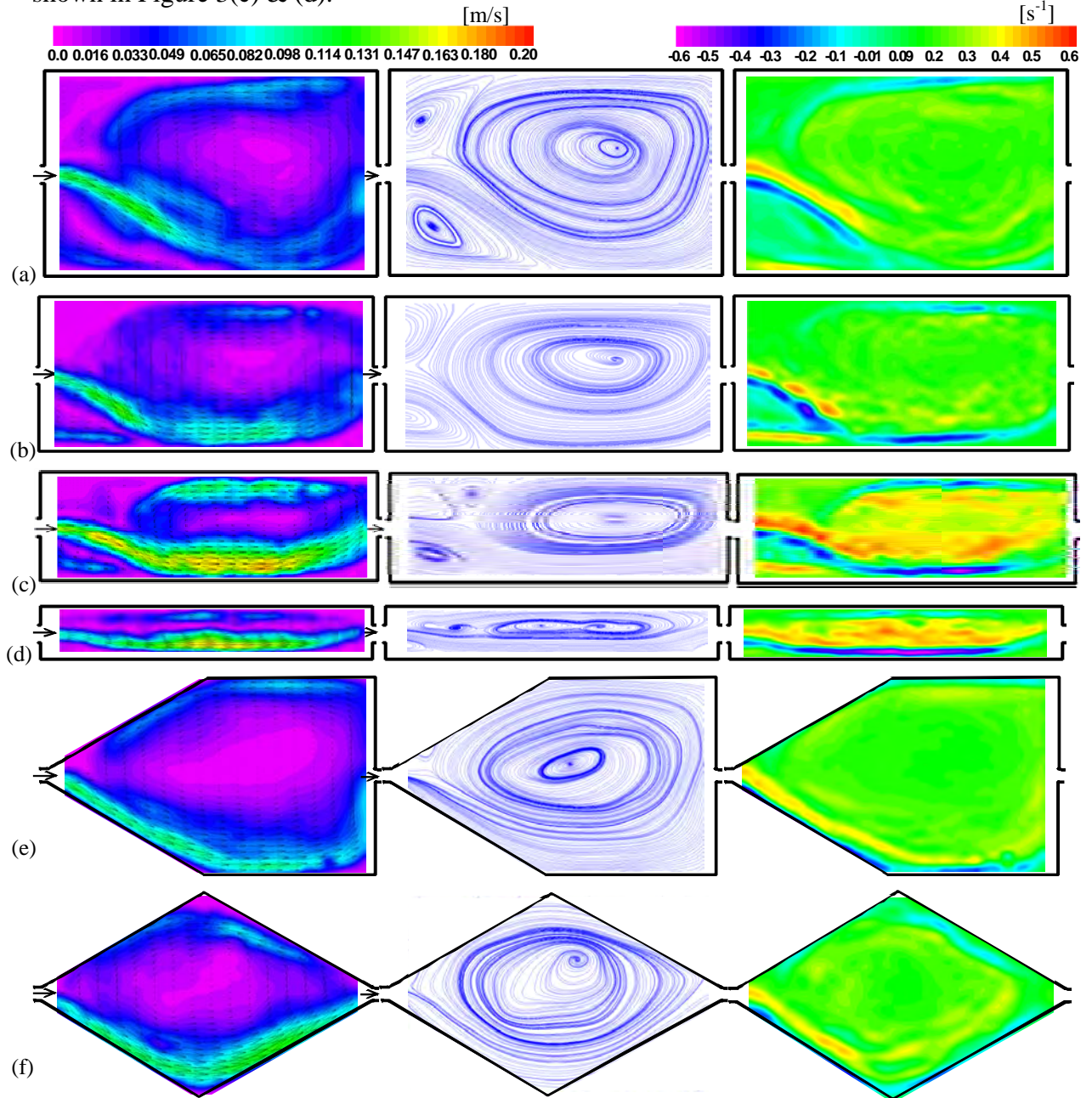


Figure 3: Average flow pattern with velocity vectors (left), streamlines (middle) and mean vorticity (right) for five different geometries with shape factors $f = 0.96$ (a), 0.67 (b), 0.375 (c), 0.122 (d), 0.75 (e), and 0.95 (f). Without sediments.

4.3 Symmetric flow for geometry shape factor $f > 0.96$

Asymmetry disappears when the geometry shape factor is higher than 0.96, as illustrated by Figure 4 (a), (b), (c) and (d) for LSPIV results for shape factors $f = 0.97$, 0.98 , 0.99 and 1.71 . By reducing the basin length and consequently increasing f ratios,

the flow is stabilized with a stable symmetrical pattern. Four vortices exist in the basin for an f ratio larger than 0.97, as shown in the middle illustration in Figure 4(a). The four gyres interact with the jet, which has some tendency to meander. By reducing the basin length for $f = 1$, the number of gyres remains constant and the flow pattern becomes rather symmetric with respect to the centerline (middle, Figure 4(b)). Completely symmetric streamlines with two vortices are exhibited in Figure 4(c) middle, for f ratio of 0.97 and a basin length less than its width.

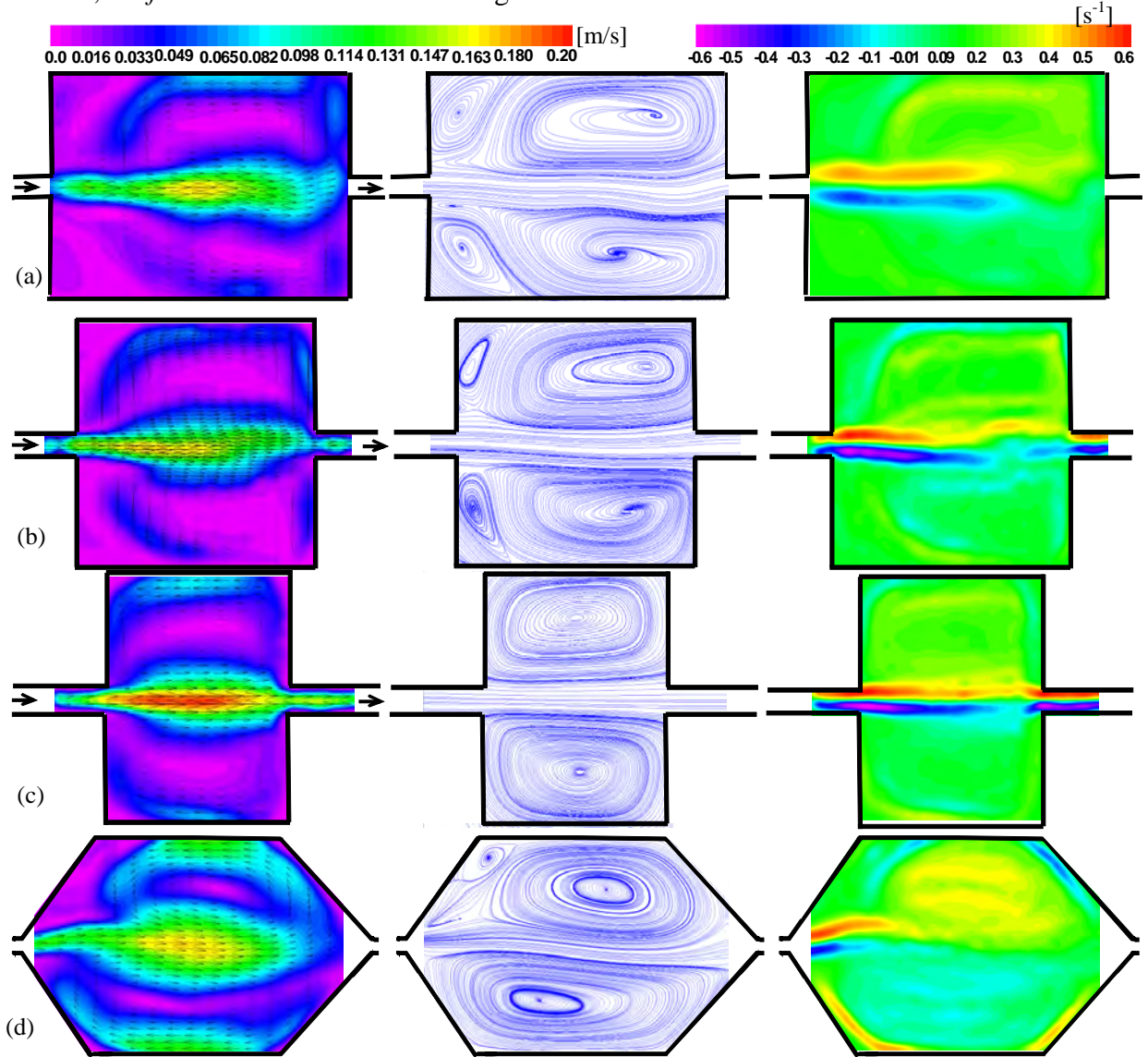


Figure. 4: Average flow pattern with velocity vectors (left), streamlines (middle) and mean vorticity (right) for four different geometries with shape factors $f = 0.97$ (a), 0.98 (b), 0.99 (c), and 1.71 (d). Without sediments.

Similar flow patterns and streamlines with two vortices occur by removing the four corners of the reference basin with f ratio of 1.71 (Figure 4(d)). The predominant change in the flow pattern is an evolution from a four-vortices flow to a distinct two-vortices flow. The corresponding vorticities for these streamlines are shown in Figures 4(a), (b), (c) and (d), on the right. By comparing these figures, it can be said that the vorticity values are increasing with decreasing basin lengths. By comparing all geometries with

$f > 0.96$, it can be concluded that similar symmetric flow patterns occur with small differences regarding the dimensions and strengths of the circulation cells.

4.4 Large coherent structures with and without suspended sediment

The flow features and large scale structures were investigated by using LSPIV measurement technique. Figure 5 shows an overview of the velocity field and behavior of large-scale coherent structures in clear water as explained before for Figure 5(a).

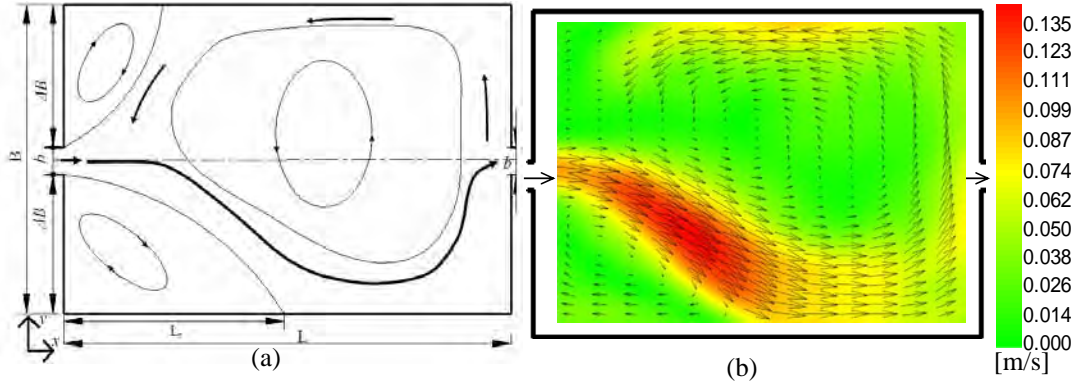


Figure 5: (a) Time averaged flow pattern and velocity magnitude (m/s) for clear water obtained by LSPIV measurements, (b) Plan view of the reference experimental setup ($L = 6$ m, $B = 4$ m) and definition of the geometrical parameter of the first recirculation cell in the basin (L_r). Discharge $Q = 7.0$ l/s, and water depth $h = 0.2$ m

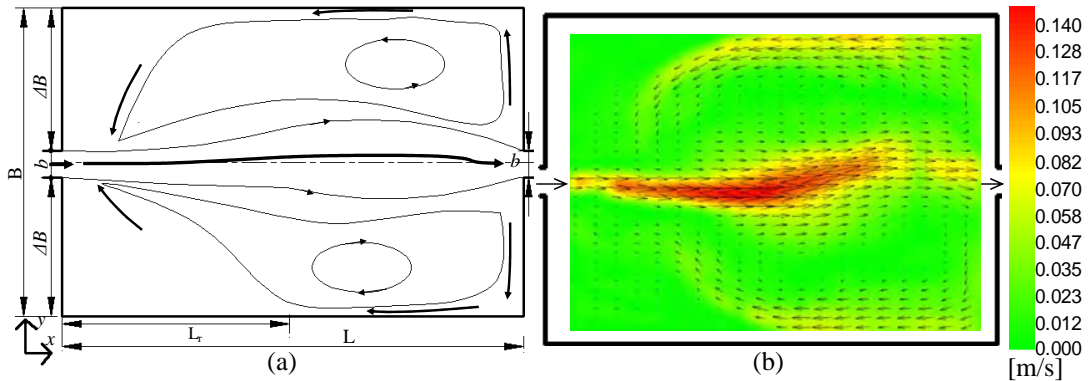


Figure 6: (a) Time averaged flow pattern and velocity magnitude (m/s) with sediment entrainment flow obtained by LSPIV measurements after 4.5 hours, (b) Plan view of the reference experimental setup ($L = 6$ m, $B = 4$ m). Discharge $Q = 7.0$ l/s, water depth $h = 0.2$ m, and suspended sediment concentration $C = 3.0$ g/l.

The addition of sediment decreases the mixing length or eddy size, the reattachment length L_r of the right corner gyre increasing with time. The flow becomes also more stable and symmetric. This fact will be explained in detail hereafter. Figure 6 shows the second flow feature developed with sediment entrainment. As a result of ripple formation and suspended sediment concentrations, the flow field is completely changed. The gyres in the upstream corners disappear and a pattern emerges rather symmetric with respect to the center line. The two remaining gyres interact with the jet which shows some tendency to meander. Since the exchange with the up-stream corners of the basin is very small, it is expected that not much deposition takes place in those areas. Apparently the changes in the bed forms or effective roughness resulting from the sediment deposition can completely modify the overall flow pattern. As a conclusion, as sediment is added to the flow, the turbulence is reduced and the mixing lengths decrease

which, together with increasing roughness, cause an increase in velocity gradient when compared to clearwater flow (see Figures 5 & 6). Several physical mechanisms may be invoked to cause these effects.

4.5 *Long term morphological evolution and corresponding flow field*

The bed morphology and the corresponding average flow field of Test 4 are shown in Figure 7 for four different runs (1.5, 3, 4.5, 18 hours) allowing a comparison of the long-term bed evolution in the reservoir. For all the tested runs, two typical features were observed. The first is the development of the sediment deposition with ripples formation concentrated on the right hand side till bed thickness deposition reaches up to 15% of the water depth. The second is concentrated along the centerline with relatively steep gradients near the inlet channel and the first part of the jet. Moreover, the deposition gradually increases generating a wider bed elevation underneath the jet centerline. The basin fills up from the center to the walls directions, starting from downstream to upstream direction. With longer period these gradient slopes regions will be eventually filled up with the finest sediment fraction. Deposits configurations in Figure 7 shows how the mixture of water and sediment is advected and diffused throughout the basin following the general flow patterns. The footprint of the flow patterns was clearly visible in the morphology. The deposition at both upstream corners is less than in other parts. The resistance to flow is relatively small on the smooth and plane bed at the start. However, the flow resistance increases as ripples are being formed. The ripples play an important role in the interaction between the boundary layer flow structures and sediment transport. The asymmetric ripples formed after 1.5 hours (run 2) near the right side wall follow the same direction as the flow pattern. Figure 6. (a) Time averaged flow pattern and velocity magnitude (m/s) with sediment entrainment flow obtained by LSPIV measurements after 4.5 hours, (b) Plan view of the reference experimental setup ($L=6$ m, $B=4$ m). Discharge $Q=7.0$ l/s, water depth $h=0.2$ m, and suspended sediment concentration $C=3.0$ g/l. However, the increased roughness height associated with mobile sediment may contribute to increase in shear velocity and turbulence intensity. The sediment concentration and sediment deposition are higher right below the main streamlines connected to the inflow channel although of existence of high velocity. Whereas, after 3.0 hours (run 3), as a result of ripple formation and suspended sediment concentration the flow field is completely changed. During 9.0 hours, most of the sediment deposits and suspended concentration are along the center of the basin. A symmetric ripples pattern formed on the middle of the basin is clearly visible. After 9.0 hours, the deposition on the center gradually increased generating a wider bed elevation underneath the jet centerline with a width of approximately three times the inlet channel. There is another longitudinal gradient between the upstream and down-stream parts. A tongue shape deposition occurs along the centerline of the basin.

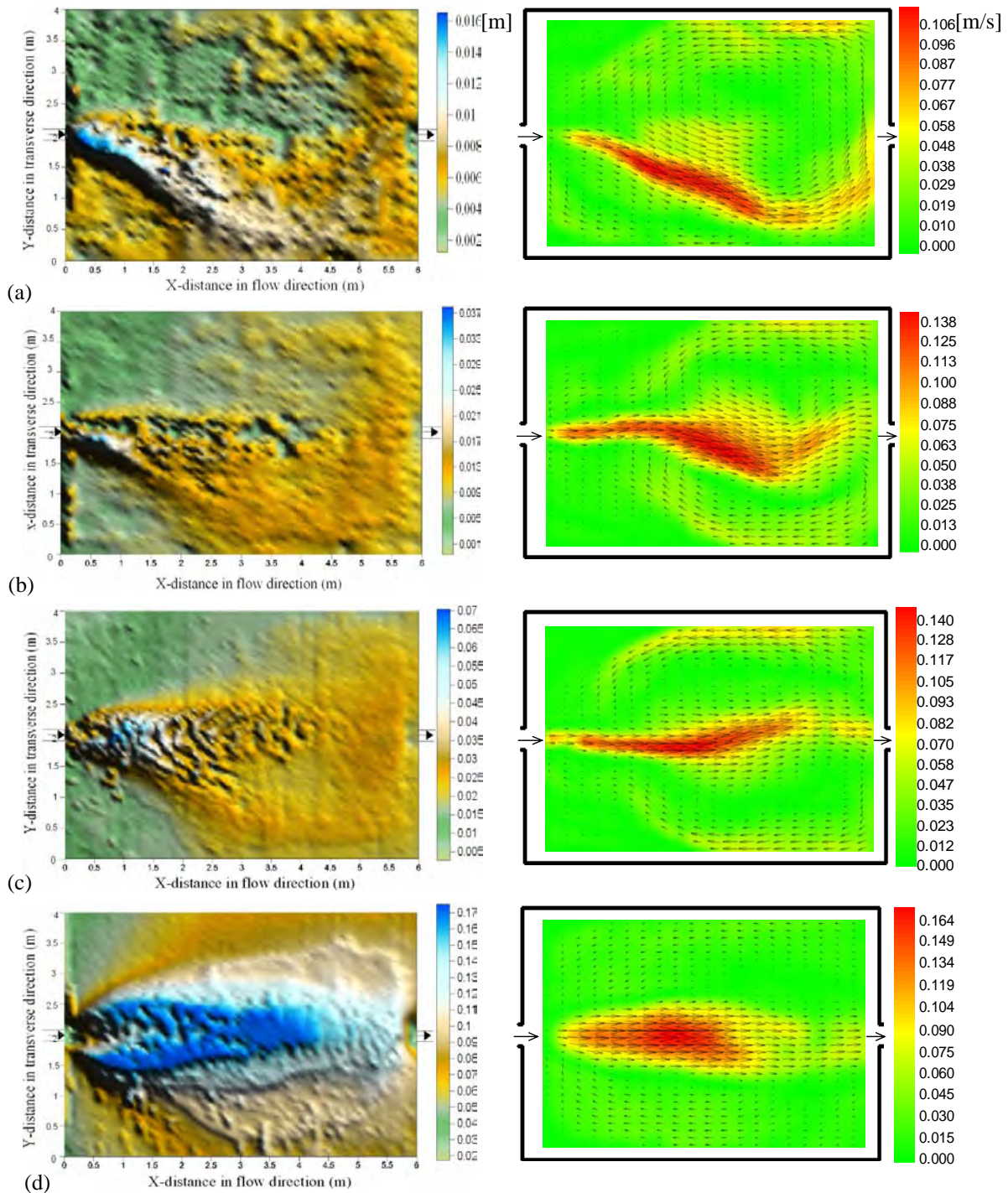


Figure 7: Long-term morphological evolution of deposition in m, (left) and flow patterns and velocities in m/s, (right) after different runs time steps (a) after 1.5hr, (b) after 3hr, (c) after 4.5hr (d) after 18.0hr. Discharge $Q = 7.0$ l/s, water depth $h = 0.2$ m and suspended sediment concentration $C = 3.0$ g/l. Caution: Full scale changes in each case

4.6 Cross sections comparison of deposition depth

A detailed comparison of transversal morphological development at four different sections is presented in Figure 8 (a, b, c and d). The time evolution of sediment deposits can be seen for the five runs (1.5 hr, 3 hr, 4.5hr, 9hr and 18 hr) at cross sections X1 =

1.5 m, $X_2 = 2.0$ m, $X_3 = 3.0$ m and $X_4 = 4.5$ m, respectively. The first 2.0 meters show different bed forms (shape and height) than the last two meters downstream. Figure 5(a) shows depositions in transversal direction of the basin at distance of 1.5 m from the inlet, for the five runs. After 1.5hr (run 2), almost a uniform depositions over the basin with average thickness of 0.015 m is observed. Due to the complete change of the flow pattern after 3hr (run 3), sediment deposition rate is slightly increased by 0.005 m. The bed thickness observed after 4.5hr (run 4) is almost two times higher than after 3.0hr (run 3) at the center but does not differ much at left and right walls. There are two transverse mild slopes of average 2% to the center. But after 9.0hr (run 5) steep slopes appear at both sides.

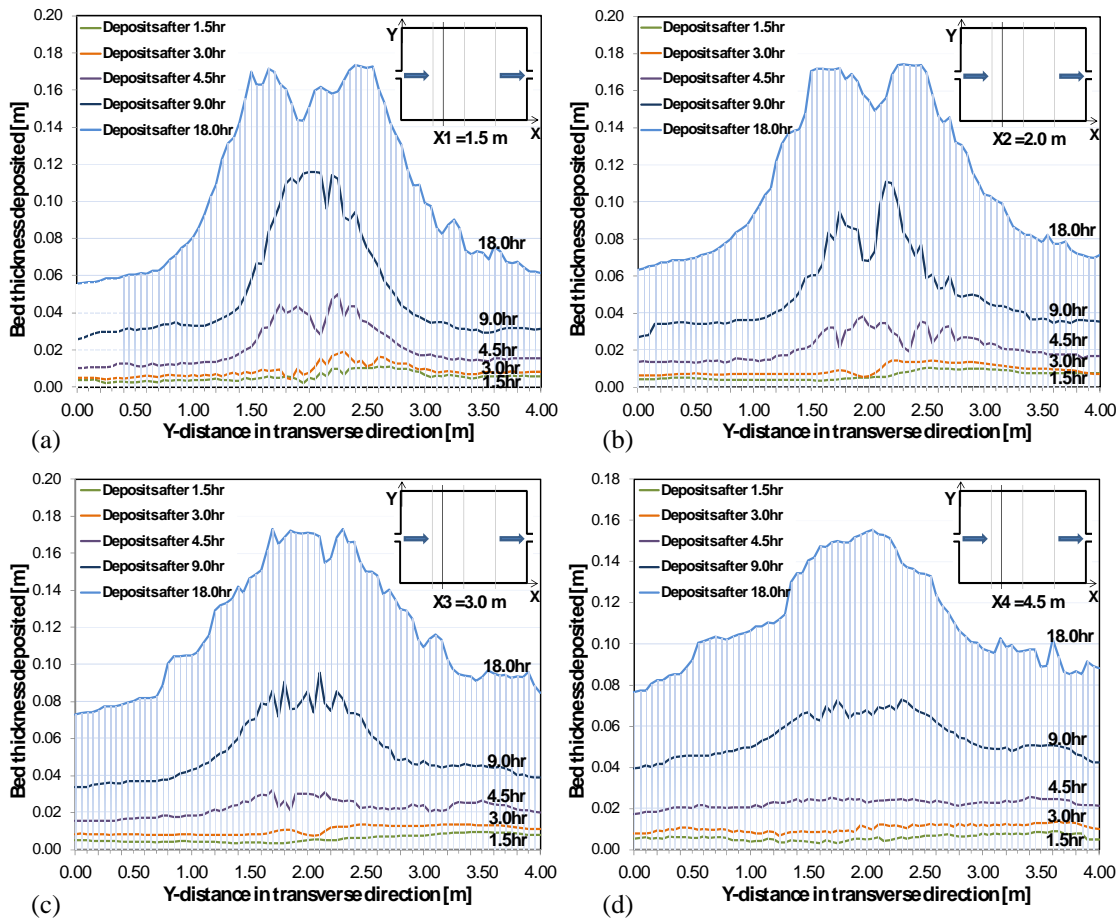


Figure 8: Comparison of bed profiles at different cross sections of the basin, (a) $X_1 = 1.5$ m, (b) $X_2 = 2.0$ m, (c) $X_3 = 3.0$ m and (d) $X_4 = 4.5$ for runs (2, 3, 4 and 5), after (1.5, 3.0, 4.5, 9.0, and 18 hours). Water depth $h = 0.2$ m.

A channel formed on the hill of the deposits along the centerline elevated mount channel forms at the center with a width of 0.75 m after 9.0hr (run 5) as shown in Figure 8(a). During 9hr of adding suspended sediment more de-positis can be observed at the center and the thickness reaches to 0.17 m after 18.0hr (run 6). A horizontal deposited reach with 2.0 m width has been formed along the centerline and still less deposits in the upstream corners. Figure shows almost constant sediment deposits within the first hours for run 2, run 3, and run 4 but the deposits rate is increased for runs 4 and 5. It may be concluded that a stable morphology has been reached after 18.0 hours and al-most morphological equilibrium in the basin has been reached for. Bed

forms are almost uniform after 1.5 and 3.0 hours but 4.5 hr deposits show wavy bed forms (Fig. 8(b)). The bed thickness observed after 9.0hr is almost three times higher than for 4.5hr. The bed becomes thicker and even more irregular after 9.0 hours. For the middle cross section, the influence of the flow deviating towards the centerline of the basin is clearly visible by strongly reduced bed thickness after 3.0hr. Also, due to the recirculation eddy, the sediment deposits gradually start to increase again in the middle. The deposition progressively increases after 4.5hr from left wall towards a peak value of 0.03 m at the middle section, followed by a small decrease at the right wall. After 18.0hr, Figure 8(c), shows almost similar sediment deposition behavior as presented in Figure 8(b). It is clearly seen that the deposition layers after 1.5, 3.0, and 4.5hr are parallel with each other and almost a uniform deposition rate is reached at both sides. But after 9.0hr the sediment deposits formed underwater-ridge at the center with mild slopes to-wards the sides. After 9 hours of testing, the deposition on the sides gradually increased generating a wider bed elevation underneath the jet centerline with a width of approximately 1.25 m.

4.7 Suspended sediment concentrations and sediment trap efficiency

The suspended sediments concentrations (SSC) at the inlet and outlet channels have been monitored in detail. Figure 9 shows SSC release from the reservoir every minute. Sediments inflow was kept constant during the test around 3.0 g/l. The sediments release in the beginning of the test for runs 2, 3 & 4, is low due to the bed formation and mixing exchange between circulations. Then it gradually in-creases during runs 5 & 6 and relatively stable at the end of run 6. After 16 hours of long period, SSC inflow and outflow are approximately equal rates at which the basin reaches to the equilibrium. Suspended sediments release for the long duration was used to calculate the sediments release and trap efficiencies, as shown in Figure 9.

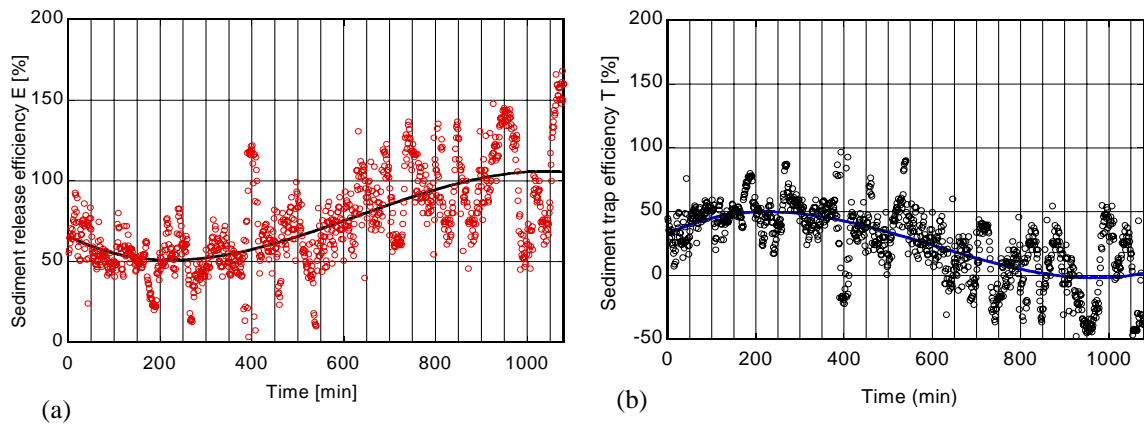


Figure 9: Evolution of sediments release E (left) and trap efficiency T (right) for long run duration (18 hr).

The sediments release efficiency (E_{release}) of a reservoir is the mass ratio of the released sediments to the total sediments inflow over a specified time period. The sediments release efficiency ($E_{\text{release}} = E$) of a reservoir is the mass ratio of the released sediments to the total sediments inflow over a specified time period. It is complementary to the trap efficiency ($E_{\text{trap}} = T$): $E = 1 - T$, where E : [-] & T : [-]. A general increasing tendency represented by parabolic curve for sediments release can be seen in Figure 9(a). The sediments release in the beginning of the test is low due to the

bed formation and mixing exchange between internal circulations. Then it gradually increases. Due to the flow deflection to the right side, as shown in Figure 7(a), ripples start to form on the right side and SSC starts to decrease as shown in Figure 6. After 3.0hr (run3), the flow pattern starts to change the direction from right to the center (see Fig. 7 (b)), and new ripples are formed at the center. The SSC decreases compared to the first run. Continuous shallowing of a reservoir causes diminution in the area of active flow in the reservoir cross section and this process is followed by an increase in flow velocity through the length of the reservoir. Then the trap efficiency for the suspended load reaches zero as shown in Figure 9(b).

4.8 *Flow field and bed morphology*

This section presents a comparison of the final bed depositions for geometries of (Test1, 2, 3, 4, 7, 8, 11, 13, 14 &16) after 4.5 hour are shown in Figure 10 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j) respectively. Experimental tests have been conducted systematically by varying width, length and removing corners with different shapes (hexagonal and lozenge). A detailed descriptions have been given for Test1, 2, 3&4, in section §4.5. The bed morphology for a reduced width of $B = 3.0$ m and 2.0m (Test7&8) have a uniform deposition rate over entire reservoir surface and symmetric ripple patterns. Flow field remains asymmetric with the reduced width. Moreover, sediment deposits are able to completely change the flow pattern. From Figures 10(e&f) it can be clearly seen that the deposition at both upstream corners is very small comparing with formation in both sides along the wall. Most of the sediments deposits right below the main streamlines connected to the inflow channel. After the flow pattern has changed to the clockwise gyre, a symmetric ripple pattern formed near the left side wall, similar to the one at the right side which formed in the beginning. After a certain period of testing, the deposition on the left side gradually increased, generating a wider bed elevation underneath the jet centerline with a width of approximately three times the inlet channel. The ripples play an important role in the interaction between the boundary layer of the flow structures and the sediments transport. By comparing the three figures it can be concluded that asymmetric flow patterns have developed differently regarding the dimensions and strength of the circulation cells in both sides. The asymmetry leading to the subsequent pattern can already be seen. Stable bed morphology has been reached after 4.5 hours. By reducing the reservoir length (Test 11&13) the flow is stabilized with a stable symmetrical pattern. By increasing centerline depositions and suspended sediment concentration the left and right circulations along the centerline disappeared with less deposit at both sides. The behavior is almost similar to a continuously growing instability observed in the reservoir with diamond geometry. Asymmetric and switching flow behavior continues towards the downstream end of the reservoir, where the jet is forced to pass through the outlet channel. Most of the sediments are deposited directly under the main streamlines connected to the inflow channel. The sediments was concentrated on both right and left sides and very low in the center of the basin (diamond, Fig. 10). By cutting the four corners flow became more stable and symmetric and has the same behavior as the reduced length reservoirs. It can be concluded that the reservoir geometry influence the behavior of the large turbulence structures. With a geometric factor $f > 0.96$, large eddies form and reduce the sediments exchange on the both sides. Therefore, fewer deposits appear at the core of the reservoir. The higher the shape factor, the more uniform and symmetric are the sediments depositions.

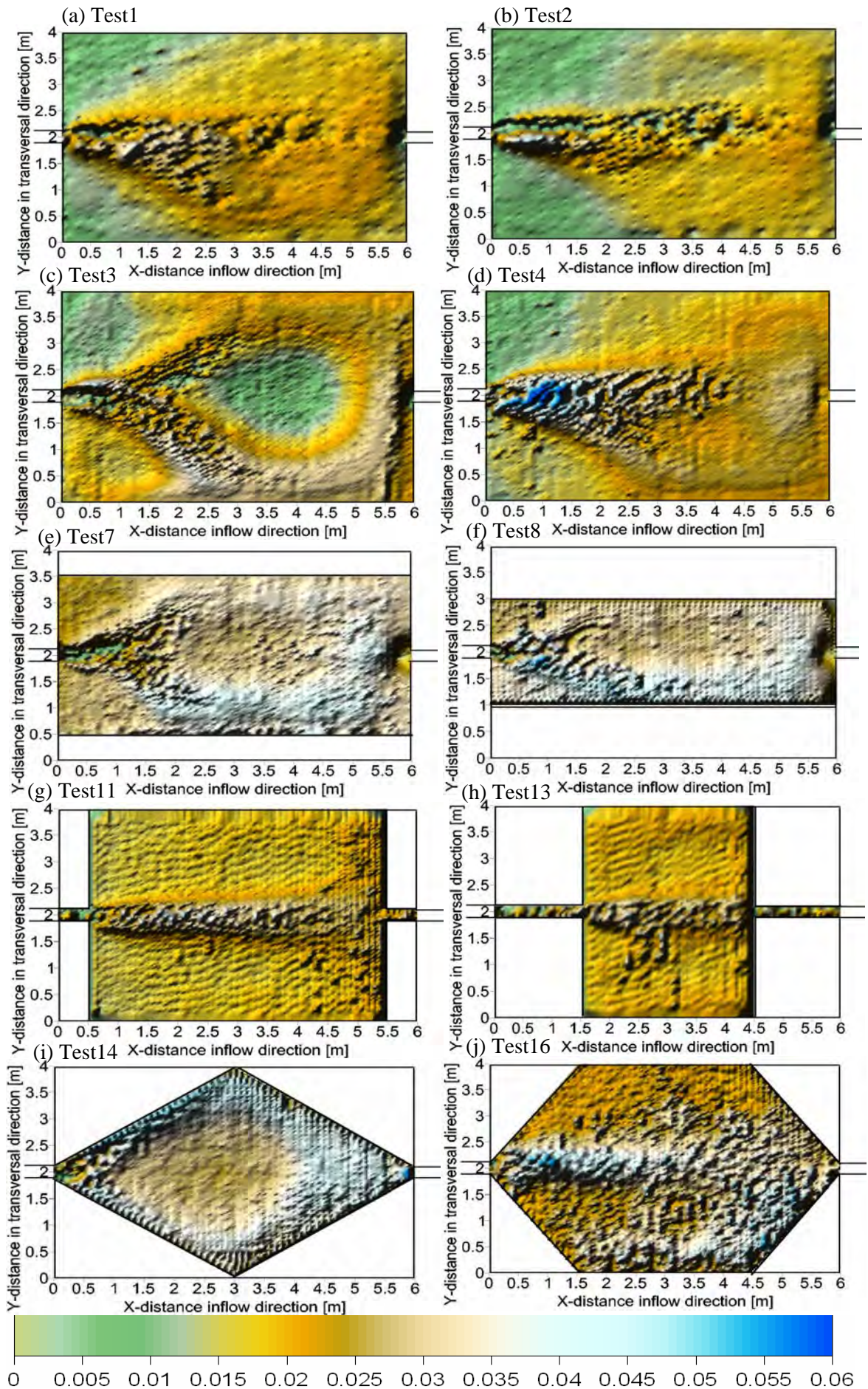


Figure: 10. Final bed deposition thickness after 4.5 hours for various geometries

Conclusions

The influence of the geometric parameters expressed by the shape factor $f = (A/P^2)*ER$ was examined for symmetric inflow and outflow conditions. Although the geometry is symmetric, the flow pattern becomes asymmetric under certain conditions. For $f \leq 0.96$, the flow changes from a symmetric structure to an asymmetric structure. The basin length has a strong influence on changing the flow field from an asymmetric flow to a stable symmetric flow. The basin width did not influence the asymmetric separation of the issuing jet. However, the size of main and secondary eddies were in accordance with the width. It can be concluded that the basin geometry influences the behavior of the large turbulence structures, and the flow is quite sensitive to the geometry shape factor.

The experiments revealed the interaction between flow and sedimentation pattern. When suspended sediment is added to the turbulent flow over a plane bed in shallow basin and transported as bed and suspended load the study revealed:

1. The large coherent structures disappear compared to clear water flow with similar flow properties.
2. The depositions and flow structure remains asymmetric with reduced width of the reservoir and disappear when reducing the length of the reservoir.
3. Turbulence is damped with bed deposition and suspended sediment entrainment.
4. Suspended sediment and ripples stabilize the flow and change the flow pattern from asymmetric with clear water to symmetric with sediments.
5. Ripples and bed form deposits with a thickness reaching 15% of the water height are directly responsible for changes in flow structure.
6. High sediments concentrations and deposits form along the main jet due to the formation of a large mixing layer between the primary and secondary gyres.
7. The loss of the free reservoir volume during 18 hr of testing was found to be about 50 %. The silting ratio is highly correlated with the initial reservoir capacity. Moreover, the total sedimentation volume grows linearly with time.

References

- Bagnold, R.A.** (1973). *The nature of saltation and of 'bedload' transport in water*. Proc. R. SOC. A, (332): 473-504.
- Babarutsi, S., Ganoulis, J., and Chu, V. H.,** (1989). *Experimental Investigation of Shallow Recirculating Flows*. J. Hydr. Eng., 115, 906-925.
- Booij, R.** (2003). *Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes*. Journal of Turbulence, 4 (March 2003).
- Brune, G.M.** (1953). *Trap efficiency of reservoirs*. Trans. Am. Geoph. Union, Vol. 34, no.3.
- Brown C.** (1943). *Discussion of sedimentation in reservoirs by B. Witzig*. Proceedings ASCE 69, 793–815, 1493–9.
- Cherdron, W., Durst, F., Whitelaw, J. H.,** (1978). *Asymmetric flows and instabilities in symmetric ducts with sudden expansions*. J. of Fluid Mech. 84, 13 - 31.
- Churchill, M.A.** (1948). *Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data by L.C. Gottchalk*. Proc. Of Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Washington DC., 139-1
- Coleman, N.** (1981). *Velocity profiles with suspended sediment*. J. Hydr. Res., 19, 211-229.
- Crowe, C. T. (1993).** *Modelling turbulence in multiphase flows*. Engineering Turbulence Modelling and Experiments 2, W. Rodi and F. Martelli, eds., Elsevier, Science Publishers BV (North-Holland) Amsterdam, The Netherlands, 899-913.
- Durst, F., Melling, A., and Whitelaw, J.,** (1974). *Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion*. J. of Fluid Mech., 64, pp. 111–128.

- Einstein, E. A., and Chien, N.** (1955). *Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution*. Univ. of California, Berkeley, and U.S. Army Corps of Engrs., Missouri River Div., Report No. 8.
- Elghobashi, S.** (1994). *On predicting particle-laden turbulent flows*. Appl. Scientific Res., (52): 309-329.
- Fearn, R., Mullin, T., and Cliffe, K.,** (1990), Nonlinear flow phenomena in a symmetric sudden expansion. J. of Fluid Mech., 211 Feb., pp. 595–608.
- Gore, R. A., and Crowe, C. T.** (1989a). *Effects of particle size on modulating turbulent intensity*. Int. J. Multiphase Flow, (15): 279-285.
- Gust, G., and Southard, J. B.** (1983). *Effects of weak bedload on the universal law of the wall*. J. Geophys. Res., (88): 5939-5952.
- Hetsroni, G.** (1989). *Particles-turbulence interaction*. Int. J. Multiphase Flow, (5): 735-746.
- Itakura, T., and Kishi, T.** (1980). *Open channel flow with suspended sediments*. J. Hydr Div., ASCE, (106): 1325-1343.
- Kantoush, S. A., Bollaert, E.F.R., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J., and Uijtewaal, W.S.J.,** (2006). *Sedimentation Processes in Shallow basins with different geometries*. IAHR Proc. of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisboa, Portugal, 1623-1631.
- Kantoush, S. A.,** (2007). *Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport*. 32nd Congress of IAHR, John F. Kennedy student competition, 1-6 July, Venice, Italy.
- Kulick, J. D., Fessler, J. R., and Eaton, J. K.** (1994). *Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow*. J.Mech., Cambridge, U.K., (277): 109-134.
- Lyn, D. A.** (1992). Turbulence characteristics of sediment laden flows open channels. J. Hydr. Engrg., ASCE, 118, 971-988.
- Morris G. & Fan J.** (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Mueller, A.** (1973). *Turbulence measurements over a movable bed with sediment transport by laser-anemometry*. Proc., 15th Cong., Int. Assn. Hydr. Res., Vol. 1, A7-1-A7-7.
- Rayan, M. A.** (1980). *Influence of solid particles in suspension on some turbulent characteristics. Multiphase transport: Fundamentals, reactor safety, applications*, Vol. 4, Hemisphere Publ. Co., New York, N. Y., 1969-1991
- Uijtewaal, W.S.J. Lehmann, D., and Mazijk A. van .** (2001). *Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments*. J. Hydr. Engrg.127(11), 928-936.
- Vanoni, V. A.** (1946). *Transportation of sediment by water*. Trans. Am. Geophys. Union, 3, 67-133.
- Vanoni, V. A.** (1953). *Some effects of suspended sediment on flow characteristics*, Proc., 5th Hydr Conf., Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Vanoni, V. A., and Nomincos, G. N.** (1960). *Resistance properties of sediment-laden streams*. Trans. ASCE, (125): 140-167.
- Xingkui, W., and Ning, Q.** (1989). *Turbulence characteristics of sediment-laden flow*. J. Hydr. Engrg., ASCE, (115): 781-800.

ACKNOWLEDGMENTS

The project is granted by Swiss Office of Environment in the frame work of the “Rhone – Thur” research project.

Authors address

Sameh A. Kantoush, Jean-Louis Boillat, Erik Bollaert and Anton Schleiss
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
 1015 Lausanne, Switzerland
 +41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
sameh.kantoush@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch, erik.bollaert@epfl.ch,
anton.schleiss@epfl.ch

**Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues,
l'environnement, la société et l'économie**

**Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt,
Gesellschaft und Wirtschaft**

Session 2

**Ökologische, sozioökonomische und flussbauliche
Prognosemodelle**

-

**Modèles de prévision économiques, écologiques et
hydrauliques**

Président de session :

Dominique Bérod, SRCE Valais

**Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues,
l'environnement, la société et l'économie**

**Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt,
Gesellschaft und Wirtschaft**

Nutzung wissenschaftlicher Prognosen zur gesellschaftlichen Entscheidungsfindung

Peter Reichert

Eine erweiterte englische Version des Beitrages findet sich in der Zeitschrift

Environmental Modelling & Software 22 (2007), 188-201

P. Reichert et al. (2007)

Concepts of decision support for river rehabilitation

Adresse des Verfassers:

Peter Reichert
Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)
P.O. Box 611
8600 Dübendorf
+41-44-823 52 81
reichert@eawag.ch

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

La participation: un outil de prise en compte de la complexité sociale dans l'aménagement des cours d'eau?

Olivier Ejderyan

Résumé

Partant du constat que la participation de la population est devenu un élément important de la politique suisse d'aménagement des cours d'eau, cet article présente les sources légales et intellectuelles du concept de participation. Il distingue deux types d'approches, l'une partant des procédures souhaitées, l'autre prenant d'abord en compte les interactions entre les acteurs sans préjuger de leur forme. En présentant brièvement un aspect de la renaturation de la Seymaz dans le canton de Genève, l'article montrera les avantages possibles de ce deuxième type d'approches.

Abstract

Public participation has become an important element of Swiss river management policy. This article presents the legal and intellectual origins of this concept. It distinguishes two types of approaches, one beginning with the procedures, while the other starts with existing interactions between actors. A brief introduction to the river Seymaz restoration project in Geneva will show possible advantages of such an approach.

1. Introduction

La participation de la population dans la prise de décision est de plus en plus présentée comme le meilleur moyen de mettre en œuvre les projets d'aménagement hydrauliques (Duram and Brown, 1999 ; Ducros and Watson, 2002). Dans un grand nombre de pays européens, des mesures participatives sont mises en œuvre dans la gestion des cours d'eaux (Le Bourhis, 1996 ; Eden *et al.*, 2000 ; Kropp, 2002, pour des exemples traitant respectivement de la France, du Royaume-Uni et de l'Allemagne). La directive cadre sur l'eau de 2000 du Parlement européen demande elle aussi la participation de la population dans la gestion de l'eau contribuant ainsi à la diffusion de ces pratiques. Cette tendance s'observe également en Suisse où les responsables de l'aménagement des cours consacrent de plus en plus de temps aux activités d'information et de

négociation avec les individus et les groupes concernés par leurs projets (Zaugg et al., 2004).

Différents instruments et procédures ont été développés pour permettre aux administrations de gérer de manière technique les processus participatifs. L'utilisation de tels instruments ne doit pas pour autant occulter la dimension politique – entendue ici au sens étymologique, c'est-à-dire ce qui concerne la vie de la cité – de la participation qui devient indispensable à prendre en compte lorsque le degré de conflictualité est élevé et que la dimension technique est utilisée pour court-circuiter une négociation de type politique, entraînant ainsi des risques de blocage total (Ejderyan, 2004; Latour, 1999).

L'article cherchera à montrer l'importance de cette dimension dans la participation en rappelant d'abord les textes dans lesquels se trouvent les références orientant sa pratique dans l'aménagement des cours d'eau suisses. Puis nous esquisserons une brève histoire de la participation illustrant ainsi son aspect politique. Nous verrons ensuite qu'il existe certaines approches qui prennent en compte cette dimension politique. Pour terminer, nous montrerons à partir de l'exemple de la renaturation de la Seymaz dans le canton de Genève dans quelle mesure laisser se déployer la dimension politique dans un processus participatif permet de prendre en compte toutes les dimensions d'un projet.

2. La participation dans l'aménagement des cours d'eau en Suisse

Afin de réduire les conflits liés à l'aménagement des cours d'eau en Suisse, les autorités, tant au niveau fédéral que cantonal, ont cherché à mettre en œuvre des politiques favorisant la prise en compte des différents acteurs concernés par ces projets qui cherchent rendre leur espace aux cours d'eau. Certaines obligations minimales sont inscrites dans les textes légaux comme l'article 3 de la Loi pour l'aménagement des cours d'eau (LACE) qui indique que « *les mesures doivent être appréciées compte tenu de celles qui sont prises dans d'autres domaines, globalement et dans leur interaction.* » Il ne s'agit toutefois ici que de la prise en compte « *d'intérêts publics* » d'autres domaines des politiques publiques comme cela est précisé dans l'article 1 de l'Ordonnance pour l'aménagement des cours d'eau (OACE). Mais ce n'est pas parce que ces intérêts publics relèvent aussi de la responsabilité d'administrations fédérales, cantonales ou communales que leur prise en compte est nécessairement plus facile et moins conflictuelle que celle des intérêts privés. Selon les responsables cantonaux de l'aménagement des cours d'eau de tels conflits surviennent particulièrement au moment de la mise en œuvre de la politique d'aménagement des cours d'eau (Zaugg et al., 2004). Les secteurs de politique publique avec lesquels il peut y avoir des conflits sont par exemple l'aménagement du territoire (rendre son tracé originel à une rivière peut entraver une occupation « rationnelle » des sols), l'agriculture (en raison de la perte de surface agricole) ou encore l'énergie (sur certains cours d'eau la présence de centrales hydroélectriques constitue un obstacle aux renaturations).

Toutefois, les aménagements de cours d'eau doivent aussi respecter d'autres contraintes légales, en particulier la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) qui dans son article 4 exige comme conditions minimales l'information des populations sur le contenu des projets ainsi qu'une mise en consultation publique des plans. L'alinéa 2 de la LAT demande que les autorités « *veillent à ce que la population puisse participer de*

manière adéquate à l'établissement des plans. » Certes, la « *manière adéquate* » n'est pas précisée dans la LAT, mais si l'on se réfère aux directives ou brochures éditées par la Confédération en matière d'aménagement des cours d'eau, on peut y trouver quelques précisions :

« La négociation précède l'action: lors de la détermination de l'espace nécessaire au cours d'eau, des intérêts divergeants [sic.] entrent en ligne de compte. » (OFEG, 2000).

« Les acteurs privés sont tout aussi importants: c'est à bon droit que les organisations économiques ou écologistes, mais aussi et surtout les acteurs directement concernés, entendent avoir voix au chapitre. Tous doivent être impliqués dans les projets, mais également prendre eux-mêmes des initiatives. Et partager la satisfaction que procurent des réussites convaincantes. » (OFEPF et al., 2003).

En ce qui concerne le contenu ou les procédures de participation, les directives développées par l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) ne donnent pas d'indication contraignante. Dans le cadre du nouveau système de péréquation financière qui sera mis en place en 2008, les subventions pour l'aménagement des cours d'eau de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) ne seront plus attribuées en fonction de la seule capacité financière des cantons, mais d'un certain nombre de critères, comme le rapport coût de l'ouvrage/valeur protégée, respect des mesures environnementales, mais aussi participation de la population (Hostmann et al., 2005). Toutefois, là encore les critères retenus pour la participation se réduisent au minimum légal souhaité .

Les textes concernant la participation produits au niveau fédéral, qu'il s'agisse des lois et ordonnances ou des documents d'orientations, affirment donc avec conviction l'importance de la participation dans les projets d'aménagement des cours d'eau. Quoique étant plutôt laconique sur les motivations de laisser participer la population, on y retrouve l'idée que cela permet une mise en œuvre facilitée des projets et que la participation serait une exigence légitime. Ce point de vue semble également être partagé par de nombreux responsables cantonaux qui nous indiquent que leur travail de coordination avec les autres services tout comme avec les communes ont augmenté au cours de ces dernières années (Zaugg et al., 2004).

Mais d'où vient au juste cet engouement de tous les acteurs de l'aménagement hydraulique suisse pour la participation ?

3. Les origines de la participation

L'idée que la population puisse directement intervenir dans les politiques la concernant n'est pas neuve et l'on pourrait en faire remonter l'origine aux différentes pensées libertaires ou autogestionnaires de la fin du 19^e siècle. S'il n'y a pas de filiation directe entre ces mouvements et la pratique de la participation dans les politiques publiques aujourd'hui, on peut toutefois y trouver les prémisses intellectuelles qui ont influencé sa diffusion dans la deuxième moitié du 20^e siècle (Barthélémy, 2000).

La plupart auteurs s'accordent pour dire que c'est vers la fin des années 1960, début des années 1970, que la volonté de participation de la population dans la formulation ou la mise en œuvre de politiques publiques (mais aussi privées si l'on pense aux politiques d'entreprises) a connu ses premiers développements (Barthélémy, 2000; Soubeyran,

2004). Les mouvements contestataires de la fin des années 1960 ainsi que les nouveaux mouvements sociaux des années 1970 ont remis au goût du jour l'idée d'une plus grande prise en main des populations par elles-mêmes. Avec l'importance croissante de la prise de conscience écologique dans les années 1970, les nouveaux mouvements sociaux ont été amenés à intervenir plus directement dans les politiques publiques à travers certaines thématiques (par exemple l'opposition à la construction de centrales nucléaires qui s'est organisée dans de nombreux pays occidentaux à cette époque). Avec l'intégration de ces mouvements dans les organismes publics mais aussi économiques au cours des décennies suivantes, l'autonomie, l'écoute des autres sont devenus des valeurs plus largement reconnues dans la société (Boltanski et Chiapello, 2000).

Pendant les années 1980 et 1990, plusieurs textes d'organisations internationales ont mentionné la participation comme l'un des moyens permettant une meilleure prise de décision administrative. On peut citer parmi ces textes:

La Charte mondiale pour la nature de l'Organisation des Nations Unies (ONU) en 1982, qui déclarait que tous les citoyens devaient être en mesure de participer individuellement ou collectivement à la formulation des politiques environnementales;

La Résolution n° 171 de 1986 sur la région, l'environnement et la participation du Conseil de l'Europe;

La Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement de l'ONU de 1992;

La Convention sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (aussi connue sous le nom de Déclaration d'Aarhus) signée en 1998.

La Déclaration de Rio est plus particulièrement considérée comme ayant eue un impact sur la diffusion de la participation dans la prise de décision. Le principe 10 de la Déclaration, repris dans les Agendas 21 locaux élaborés par de nombreuses municipalités et collectivités territoriales partout sur la planète stipule que :

« *La meilleure façon de traiter les questions d'environnement est d'assurer la participation de tous les citoyens concernés, au niveau qui convient.* » (ONU, 1992).

Cet accroissement de la participation dans la prise de décision se reflète également dans l'augmentation du nombre de recherches universitaires et d'articles scientifiques portant sur le sujet ; ceux-ci ont augmenté dans une telle mesure que certains auteurs viennent à parler d'un « *paradigme* » participatif (Sellamna, 1999; McGuirk 2001), de « *nouvelle orthodoxie* » (Smith, 2003) ou encore « *d'effet de mode* » (Müller und Kollmair, 2004). L'engouement des personnes et institutions en charge de la conduite de projets et tel, qu'on peut penser qu'ils voient la participation comme une panacée offrant des possibilités d'application linéaire (Geiser, 2001).

En Suisse, le système de démocratie semi-directe permet aux citoyens une influence plus directe sur la formulation des politiques publiques. Les possibilités de référendum et d'initiative permettent aux citoyens de s'opposer directement à certaines lois mais aussi de proposer des modifications à la Constitution. L'existence de ces instruments favorise également la participation en amont, au moment de la formulation des lois au cours de la phase pré-parlementaire, car les différents groupes d'intérêts sont alors

consultés et leurs arguments éventuellement pris en compte afin d'éviter un référendum par la suite (Kriesi, 1998). Toutefois, ces procédures ne permettent pas de prévoir les oppositions locales qui peuvent survenir face à des textes pourtant acceptés par une grande majorité des citoyens. Ce sont généralement des conséquences négatives, subies par un petit nombre d'acteurs localisés, qui provoquent les conflits apparaissant au moment de la mise en œuvre de ces textes.

4. Les modalités de participation

On distingue deux tendances dans la littérature concernant l'usage du mot participation. Une première, que nous avons retrouvé plutôt dans la littérature concernant l'aménagement du territoire, distingue les différentes modalités de prise en compte des acteurs concernés par les pouvoirs publics. Dans cette approche, qui remonte déjà aux années 60 avec l'article fondateur d'Arnstein (1969), on établit un gradient en fonction du degré d'implication des acteurs et de la manière dont leur remarques seront prises en compte. Ce gradient va généralement de l'information à la participation, en passant par la consultation ou la concertation, la participation étant identifiée comme une situation où les pouvoirs publics et les autres acteurs auraient le même pouvoir de décision. Ce type d'approche se retrouve fréquemment dans la littérature sur l'aménagement ou le génie (Pacione, 1988; Mettan, 2002; Luyet, 2005) dans la mesure où il permet aux autorités souhaitant mettre en œuvre un processus participatif de choisir à priori une procédure en fonction des acteurs qu'elles souhaitent prendre en compte et du degré d'implication qu'elles veulent leur laisser (Luyet, 2005).

Une autre approche parle de participation, concertation, ou délibération d'une manière générale, en mettant avant tout l'accent sur l'interaction entre différents acteurs, sans préjuger pour autant de ce que sera le degré d'implication et de prise en compte des acteurs (même si la plus large possible est généralement déclaré comme souhaitable) ni la forme qu'elle prendra. Dans une telle optique:

« participation is understood [...] as the purposive interaction of specific social actors with other social actors in view of achieving specific outcomes. » (Geiser, 2001)

Ce type de définition « souple » de la participation à l'avantage de ne pas préjuger de la forme précise que prendra, ou devrait prendre la participation des acteurs dans un processus décisionnel. Elle permet de prendre en compte les acteurs qui n'ont pas été invités par les décideurs, ceux qui forcent leur entrée dans la négociation et avec qui il faut alors composer (Tanquerel, 1988). Le résultat de ces négociations est relativement ouvert, même s'il ne faut jamais perdre de vue que les administrations gardent pour objectif la réalisation de leur projet. Ces procédures sont généralement longues, perçues parfois comme une gêne par les décideurs mais peuvent également présenter des avantages dans la mesure où leur ouverture permet d'arriver à des solutions non-imaginées initialement.

5. Avantages d'une approche ouverte pour l'aménagement des cours d'eau: l'exemple de la Seymaz dans le canton de Genève

Le cas de la renaturation de la Seymaz dans le Canton de Genève offre un exemple de participation « ouverte » ayant abouti à une solution inattendue. Cette rivière de 11 km de long, seul cours d'eau entièrement situé sur le territoire genevois (ill. 1), a fait l'objet d'un projet de renaturation voté par le Grand Conseil en 1998. Après 7 ans de négociations, en octobre 2005, les travaux de renaturation ont pu débuter. Toutefois, alors que le projet initial proposé par l'administration proposait un élargissement du cours d'eau et la création d'un bassin de rétention, la mouture finale prévoyait la recréation d'un marais et le maintien de canaux rectilignes. Voyons comment se résultat à pu être obtenu.

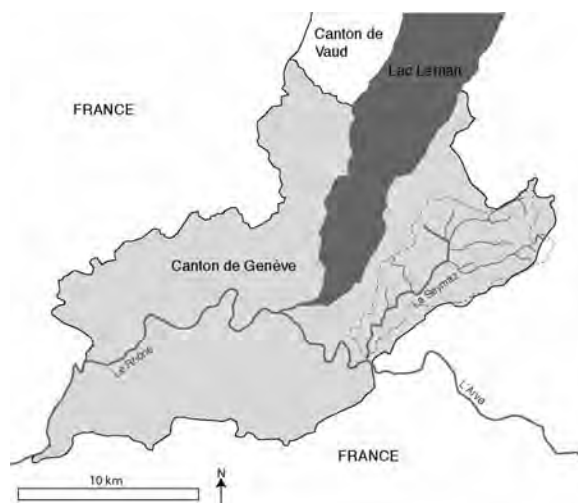


Illustration 1. Le bassin de la Seymaz. Carte O. Ejderyan.

Une première loi cantonale sur la renaturation de la Seymaz fut votée par le parlement genevois en décembre 1998. Auparavant, l'administration avait signé une « Charte Seymaz » avec les acteurs concernés: représentants du monde agricole et écologistes s'engageaient à soutenir le projet de loi devant le Grand Conseil seraient intégrés dans l'élaboration du projet. Ce premier volet visait à réaliser une remise à ciel ouvert de la rivière sur une parcelle appartenant à l'état, acquérir des terrain pour permettre la renaturation et poursuivre les études en vue de présenter un projet de renaturation de la partie canalisée.

Un groupe « Charte Seymaz » fut instauré afin de permettre aux différentes parties de s'exprimer sur le projet. Composé des signataires de la Charte auxquels s'ajoutèrent des représentants des municipalités touchées par le projet et d'associations de riverains, ce groupe se réunit à partir de mars 1999. Sa mise en place fut saluée par l'ensemble des participants. Cependant, dans le courant de l'année 2002 les agriculteurs eurent l'impression que le groupe « Charte Seymaz » se transformait en groupe de validation des décisions de l'Etat et n'était plus un espace de concertation. Ils avaient en particulier l'impression de se voir imposer des solutions techniques qu'ils ne comprenaient pas et qui étaient présentés comme les seules possibles. De plus, bien que d'accord sur le principe d'une renaturation, les agriculteurs estimaient que leur « histoire », leur vécu collectif n'était pas pris en compte dans le projet. Les responsables de l'administration

estimant que ces références étaient faites uniquement pour ralentir le projet refusaient d'en tenir compte.

En conséquence, les agriculteurs décidèrent de cesser leur participation au groupe de discussion en janvier 2003 et exigèrent un contact direct avec les mandataires en charge de l'élaboration du projet. Un « groupe d'accompagnement » regroupant les propriétaires de parcelles concernées par la renaturation ainsi que les mandataires fut créé (il comptait par ailleurs le représentant d'une association de défense de l'environnement propriétaire d'une parcelle à vocation écologique).

Dans le cadre du groupe d'accompagnement lancé en août 2003 et dont les travaux se sont terminés en décembre 2004, les agriculteurs n'ont pas trouvé d'opposition leur disant « on ne peut pas faire autrement », mais des ingénieurs prêts à revoir chacun de leurs calculs. Une autre différence a résidé dans le fait que les connaissances locales des agriculteurs ont été prises en compte sérieusement par les mandataires et qu'elles ont permis d'éviter certaines erreurs, comme la décanalisation de la rivière qui aurait pu provoquer une pollution de la nappe phréatique par les eaux polluées de la Seymaz. Mais ce qui a principalement entraîné l'adhésion des agriculteurs au projet et que leurs revendications identitaires ont été prises en compte. Cela a pu se faire car les ingénieurs ont modifié le projet de renaturation de la Seymaz en supprimant les élargissements sur les canaux, mais en proposant la recréation du marais qui existait sur ce même lieu jusqu'au début du 20^e siècle. Paradoxalement, alors que dans cette deuxième variante la surface de terres agricoles submergées en permanence est sensiblement plus élevée que dans le premier projet, les agriculteurs ont accepté ce projet, estimant qu'il respectait mieux leur cadre de vie.

6. Conclusions

Différents éléments plaident pour une approche ouverte de la participation dans le cadre de projets d'aménagement de cours d'eau. D'une part, si la plupart des processus participatifs prennent aujourd'hui une forme technique en suivant des procédures formalisées, le concept prend ses racines dans des revendications politiques. Chez certains acteurs, notamment ceux ayant pris part aux mouvements sociaux des années 1970, cette dimension est encore présente.

Lorsque, comme nous l'avons montré avec l'exemple de la Seymaz surviennent des demandes concernant le projet qui ne relèvent pas directement de l'intérêt matériel des acteurs ou des aspects techniques, une participation ouverte peu prendre en compte ses éléments. Ces demandes peuvent être imprévisibles et émerger du processus participatif lui-même en révélant aux acteurs des aspects de leur cadre de vie qui ne leur apparaissaient pas jusqu'alors. Toutefois, comme on peut le voir dans le cas de la Seymaz. Celui-ci ne doit pas être ignoré si l'on décide lancer un tel processus participatif. C'est pour cette raison que de tels processus ouverts sont plus appropriés dans les situations à forte conflictualité.

Bibliographie

- Arnstein, S.** (1969). *A Ladder of Citizen Participation*, Journal of the American Institute of Planners, Vol. 35, 216-224.
- Barthélemy, M.** (2000). *Associations, un nouvel âge de la participation*, Paris, Presses de Sciences Po.
- Boltanski, L. et E. Chiapello** (2000). *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris, Gallimard.
- Callon, M., P. Lascoumes et Y. Barthe** (2001). *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Seuil.
- Ducros, C. and N. M. Watson** (2002). *Integrated Land and Water Management in the United Kingdom: Narrowing the Implementation Gap*, Journal of Environmental Planning and Management, Vol. 45, Nr. 3, 403-423.
- Duram, L. A. and K. G. Brown** (1998). *Assessing Public Participation in U.S. Watershed Planning Initiatives*, Society and Natural Resources, Vol. 12, 455-467.
- Eden, S., S. M. Tunstall and S. M. Tapsell** (2000). *Translating Nature: River Restoration as Nature-Culture*, Environment and Planning D: Society and Space, Vol. 18, 257-273.
- Ejderyan, O.** (2004). *Science 'déjà faite' et science 'en train de se faire' dans un processus participatif de prise de décision. Le cas de la renaturation de la Seymaz dans le canton de Genève*, in Helga-Jane Scarwell et Magalie Franchomme (dir.). *Contraintes environnementales et gouvernance des territoires*, La Tour d'Aigues. Éditions de l'Aube, 309-316.
- Geiser, U.** (2001). *To 'Participate' with Whom, for What (and against Whom): Forest Fringe Management along the Western Ghats in Southern Kerala*, in B. Vira and R. Jeffery (eds.). *Analytical Issues in Participatory Natural Resource Management*, New York, Palgrave, 19-36.
- Kriesi, H.** (1998). *Le système politique suisse*, Paris, Economica.
- Kropp, C.** (2002). « *Natur* » *soziologische Konzepte, politische Konsequenzen*, Opladen, Leske und Budrich.
- Latour, B.** (1999). *Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie?* Paris, La Découverte.
- Le Bourhis, J. P.** (1996). *Des riverains à la rivière. Les transformations d'une politique de l'eau*, in C. Méadel et V. Rabeharisoa (dir.). *Représenter, Hybrider, Coordonner*. Paris, École des Mines de Paris, 171-178.
- Luyet, V.** (2005). *Base méthodologique en vue d'introduire les processus participatifs dans la gestion du paysage: cas d'application de la plaine du Rhône en Suisse*, Thèse de doctorat Lausanne, GECOS, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- McGuirk, P. M.** (2001). *Situating Communicative Planning Theory: Context, Power and Knowledge*, *Environment and Planning A*, Vol. 33, Nr. 2, 195-217.
- Mettan, N.** (2002). *Utilité et place de la négociation dans la planification*, Journée d'étude de l'ASPAN, Neuchâtel.
- Müller, U. und M. Kollmair** (2004). *Die Erweiterung des Schweizerischen Nationalparks. Der Planungsprozess 1995-2000, betrachtet aus partizipationstheoretischer Sicht*, DISP, Nr. 159, 44-51.
- OFEFP, OFEG, OFAG et ARE** (2003). *Idées directrices. Cours d'eau suisses, pour une politique de gestion durable de nos eaux*, Berne, OFEFP/OFEG.
- OFEG** (2000). *Réserver de l'espace pour les cours d'eau*, Bienne, OFEG.
- ONU** (1992). *Déclaration de Rio sur l'Environnement et le développement*, New York, Genève, Organisation des Nations Unies.
- Pacione, M.** (1988). *Public Participation in Neighbourhood Change*, *Applied Geography* Vol. 8, 229-247.
- Sellamna, N.-E.** (1999). *Relativism in Agricultural Research and Development: is Participation a Post-modern Concept?* Working Paper 119, London, Overseas Development Institute, 59.
- Smith, G.** (2003). *Deliberative Democracy and the Environment*, London, Routledge.

- Soubeyran, O.** (2004). *Espace public, aménagement et environnement*, in V. Berdoulay, P.C. da Costa Gomes et Jacques Lolive (dir.). *L'espace public à l'épreuve : régressions et émergences*. Bordeaux, Maisons des sciences de l'homme d'Aquitaine, 31-38.
- Tanquerel, T.** (1988). *La participation de la population à l'aménagement du territoire*, Lausanne, Payot.
- Zaugg, M., O. Ejderyan und U. Geiser** (2004). *Normen, Kontext und konkrete Praxis des kantonalen Wasserbaus. Resultate einer Umfrage zu den Rahmenbedingungen der kantonalen Ämter oder Fachstellen für Wasserbau bei der Umsetzung der eidgenössischen Wasserbaugesetzgebung*, Zürich, GIUZ.

Remerciement

Ces travaux ont été financés par le projet Rhône-Thur.

Adresse de l'auteur

Olivier Ejderyan
Abteilung Humangeographie
Geographisches Institut, Universität Zürich
8057 Zürich, Schweiz
+41-44-635 51 78
<http://www.geo.uzh.ch>
olivier.ejderyan@geo.uzh.ch

Sohlenentwicklung in einer Flussaufweitung beim Durchgang einer Hochwasserwelle – Vergleich zwischen Messung und numerischer Modellierung

Roland Fäh, Renata Müller, Patric Rousselot, David Vetsch

Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahrhunderten sind ein Grossteil der schweizerischen Flüsse aus Hochwasserschutzgründen reguliert worden. Dabei wurden die Flussläufe verkürzt, begradigt und verengt, indem sie in ein prismatisches Gerinne gezwungen wurden. Das Gefälle und damit auch die Transportkapazität wurden dadurch erhöht, weshalb die Gerinne begannen sich einzutiefen. Als Gegenmassnahme wurden Sohlschwellen eingebaut. Durch die Hinterfüllung der Schwellen wurde das Sohlgefälle reduziert und das Sedimenttransport-Regime verändert. Negative Folge dieser Massnahme war, dass die Fische nicht mehr zu ihren Laichgründen aufsteigen konnten. Generell kann festgestellt werden, dass bei früheren Flusskorrekturen die technischen Aspekte des Hochwasserschutzes im Vergleich zu den Ökologischen stärker gewichtet wurden.

Mit den neuen Richtlinien zur Gestaltung des Hochwasserschutzes an Fliessgewässern (z.B. Bundesamt für Wasser und Geologie 2001) hat sich dies geändert. Als wichtigstes Prinzip wird darin gefordert, dem Fluss mehr Raum zur Verfügung zu stellen. Erreicht wird dies, indem der Fluss lokal aufgeweitet wird. Durch die grössere Flussbreite in der Aufweitung wird die Transportkapazität reduziert, das Geschiebe lagert sich ab und man erzielt so eine zu den Schwellen analoge, sohlstabilisierende Wirkung. Die Morphologie des Flusses nähert sich wieder einem natürlichen Zustand an und beginnt - je nach Verhältnis von Länge zu Breite der Aufweitung – wieder zu mäandrieren oder bildet ein verzweigtes Gerinne.

Die Renaturierungsmassnahmen dürfen die Hochwassersicherheit nicht beeinträchtigen. Um dies zu gewährleisten werden Hochwassersituationen numerisch simuliert, wobei meist vorausgesetzt wird, dass sich die Flusssohle nicht verändert. Wie die alpinen Hochwasser der letzten Jahre gezeigt haben kann dies zu einer falschen Einschätzung der Situation führen (Bezzola und Hegg, 2007). Im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts wurde deshalb ein Programmsystem entwickelt, mit dem Hochwassergefahren unter Berücksichtigung des Sedimenttransports und der beweglichen Sohle beurteilt werden können. Die Software heisst BASEMENT, ist gut dokumentiert und kann von der Webpage www.basement.ethz.ch heruntergeladen werden.

Die Möglichkeiten und Grenzen von solchen numerischen Modellen werden am Beispiel der Thuraufweitung bei Altikon aufgezeigt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Veränderung der Sohle, welche sich beim Durchlauf einer Hochwasserwelle ergibt.

Abstract

During the last two centuries, most of the rivers in Switzerland have been regulated to reduce the flood risks. The rivers were straightened by cutting the meanders, canalized and narrowed. As a consequence, the specific bed load capacity increased and the river beds degraded. To stabilize the river beds sequence of sill were build. Thus, the slope of the river bed between the sills was reduced and the sediment retained. A negative consequence of this measures was that the sills prevented the fishes to swim upstream and thus to get to their spawn places. In general, it can be stated that in earlier days the design of river training works was guided by a technical point of view. The ecological aspects were poorly considered.

Nowadays, environmental aspects have become more important. In river engineering, this led to the idea to concede more space to the rivers. A particular restoration measure was, to replace the sills by a local widening of the river bed. Due to the increased width the bed load capacity in the widening is reduced and the sediment is locally accumulated and thus has an analogous function as the sills. Depending on the length and width of the widening, the morphology of the river bed develops towards a more natural state like meandering or even braiding.

Of course this restoration measures should not affect the flood protection. To ensure this, numerical models are applied to determine the water-surface elevations during a flood. In most cases, such simulations are based on a fixed-bed approach. As the recent floods in the Alpine region of Switzerland revealed, this can lead to a wrong assessment of the risks. Therefore, in the framework of the Rhone-Thur project a software system was developed allowing for the simulation of flood events with consideration of the sediment transport and the corresponding changes of the riverbed. The software is called BASEMENT and can be downloaded from www.basement.ethz.ch.

To investigate the possibilities and limitations of different numerical approaches, the corresponding models were applied to a widening of the Thur River which was carried out near Altikon. The focus will be on the alteration of the river bed as it takes place during a flood wave.

1. Einleitung

Im Laufe der letzten 15 Jahre wurden im Alpenbereich viele Flussaufweitungen realisiert (z.B. Zarn 1993, Hunzinger and Zarn 1997, Habersack et al. 2000, Schmutz 2004). Ziel dieser Massnahmen war, die während der letzten zwei Jahrhunderte korrigierten Flüsse zu revitalisieren. Bei den früheren Flusskorrekturen wurden die Gerinne begradigt und verengt. In der Folge begannen sich die aus dem Gleichgewicht gebrachten Flüsse einzutiefen. Die Hochwasserschutzdämme wurden unterspült und die Grundwasserspiegel im Umland der Flüsse abgesenkt. Um die Erosion zu stoppen,

wurden ganze Kaskaden von Schwellen eingebaut; mit negativen Folgen für Flora und Fauna. An Stelle der Schwellen werden heute Aufweitungen gebaut. Sie sollen die Flusssohle stabilisieren und gleichzeitig den Flussraum ökologisch aufwerten.

Die Querprofile der korrigierten Flüsse bestehen meist aus einem Hauptgerinne das auf beiden Seiten von Vorländern eingefasst ist (Abb. 1).



Abb. 1: Die Thur bei Altikon: Links nach der Korrektur des 19. Jahrhunderts, rechts nach der Aufweitung des Hauptgerinnes. Schon zwei Jahre nach der Revitalisierungsmaßnahme hat sich die morphologische Vielfalt deutlich verbessert.

Die Aufweitung wird entweder maschinell durch Ausbaggerung der Vorländer erstellt oder man entfernt nur den Böschungsschutz des Hauptgerinnes und erlaubt dem Fluss sich eigendynamisch durch Seitenerosion aufzuweiten.

Die Abflusstiefe ist im aufgeweiteten Bereich des Flusslaufs tiefer als oberhalb des Zulaufs. Durch die Verengung am unteren Ende der Aufweitung kann ein Rückstau entstehen, der die Strömung verlangsamt. Beide Prozesse verringern die Geschiebetransportkapazität im Bereich der Aufweitung, was zu Auflandungen der Flusssohle führt.

Beobachtungen in der Natur und Untersuchungen an physikalischen und numerischen Modellen haben jedoch gezeigt, dass sich die erwartete Auflandung in der Aufweitung nicht immer einstellt. Je nach Lage der Aufweitung innerhalb eines längeren Flussabschnittes bildet sich bei einem Geschiebedefizit an Stelle eines mäandrierenden oder gar verzweigten Gerinnes ein dominantes Einzelgerinne mit einer entsprechend tiefen Sohlenlage (Requena et al. 2005, Marti and Bezzola, 2004).

Während eines Hochwassers kann die Entwicklung der Flusssohle nicht beobachtet werden. Die Form des Gerinnes lässt sich nur bei Niedrigwasser vor und nach dem Hochwasserereignis festhalten. Um die morphologische Entwicklung des Gerinnes beim Durchgang einer Hochwasserwelle nachvollziehen zu können ist man deshalb auf Simulationen angewiesen. Da Untersuchungen am physikalischen Modell meist zu aufwendig sind, ist man auf numerische Modelle angewiesen.

Die hier dokumentierte Untersuchung hatte zum Ziel, Möglichkeiten und Grenzen von solchen Modellen aufzuzeigen. Die entsprechenden numerischen Simulationen umfassen:

- Die Beurteilung des Einflusses der beweglichen Sohle auf die Lage des Wasserspiegels
- Die Analyse der Sohlenentwicklung während des Durchgangs des Hochwassers
- Eine Beurteilung der Grenzen von ein- und zweidimensionalen Modellen.

Die Untersuchungen wurden am Beispiel der Aufweitung der Thur bei Altikon durchgeführt. Diese Aufweitung eignet sich, weil hier - im Rahmen des „Rhone-Thur“-Projektes - die Entwicklung des Gerinnes durch ein intensives topographisches Monitoring begleitet wurde (Abb. 2).



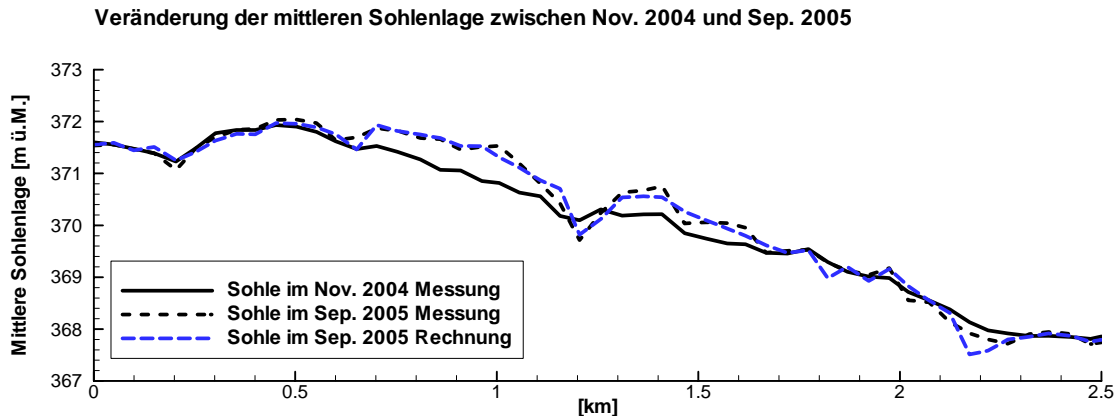
Abb. 2: Topographisches Monitoring der Aufweitung bei Altikon. Die Entwicklung des Gerinnes wird mit Querprofilen mit grosser räumlicher (max. Abstand 50m) und zeitlicher Auflösung aufgenommen.

2. Reaktion der Aufweitung bei Altikon auf den Durchgang der Welle des Hochwassers von 2005

Das Mittelgerinne der Thur wurde unterhalb der Schrägseilbrücke Altikon auf einer Länge von etwa 1.5 km wechselseitig aufgebrochen (siehe Schema Abb. 3 b). Die Aufweitung ist nicht durchgängig. Sie wird durch zwei Einschnürungen unterbrochen. Der linke Hochwasserschutzdamm ist durch Bühnen geschützt. Auf der rechten Seite befindet sich ein Auenwald von nationaler Bedeutung. Das Flussbett der Thur wird sich hier um mehr als das Doppelte auf ca. 100 m aufweiten können. Schon kurze Zeit nach der Realisierung der verschiedenen flussbaulichen Elemente zeigte sich, dass sich die angestrebte Vielfalt der Sohlenstruktur einstellt. An den Bühnenköpfen entstanden Kolke, durch Auflandungen bildeten sich Kiesbänke und der Talweg begann zu mäandrieren was bei Niedrigwasser entsprechende Querströmungen zur Folge hatte. Diese haben das nur mit Raubäumen und Faschinen gesicherte Ufer seitens des Auenwalds teilweise zerstört. Die erwünschte Dynamik hat sich also eingestellt, wobei die Beobachtungen und auch die numerischen Simulationen zeigen, dass nur grössere Hochwasser das Flussbett massgeblich umgestalten können.

Abb. 3 a) zeigt die gemessene Veränderung der mittleren Sohle zwischen dem November 2004 und dem September 2005. In dieser Zeit ereigneten sich zwei kleinere Hochwässer mit einem Q_{\max} von ungefähr $400 \text{ m}^3/\text{s}$ und das etwa 20-jährige Hochwasser im August mit einem $Q_{\max} = 930 \text{ m}^3/\text{s}$. Insgesamt wurden im Bereich des

a) Längsprofil der Aufweitungen der Thur bei Altikon



b) Konfiguration der Aufweitungen



Hauptgerinnes der Aufweitung etwa 7400 m^3 Material abgelagert, wobei die numerischen Simulationen zeigen, dass die beiden kleineren Hochwasser nur einen marginalen Beitrag zu den totalen Sohlveränderungen leisten.

Abb. 3: Veränderung der mittleren Sohle zwischen November 2004 und September 2005.

a) Längsprofil der gemessenen und gerechneten mittleren Sohle

b) Schema der Konfiguration der Aufweitungen

In Abb. 4 ist die Differenz der Sohlenlagen zwischen der Messung vom September 2005 und November 2004 dargestellt. Dabei wurden nur die Veränderungen der Sohle im Bereich des Hauptgerinnes berücksichtigt, weil nicht alle Querprofile mit Vorländer aufgenommen wurden und somit die Bildung der Differenz verfälscht worden wäre.

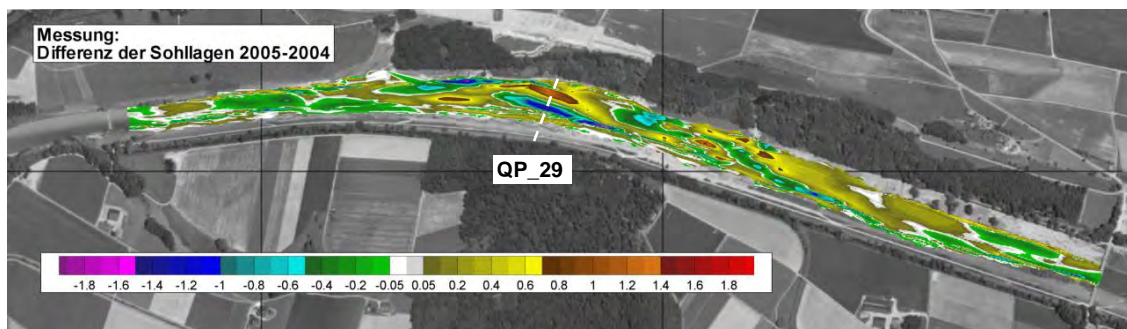
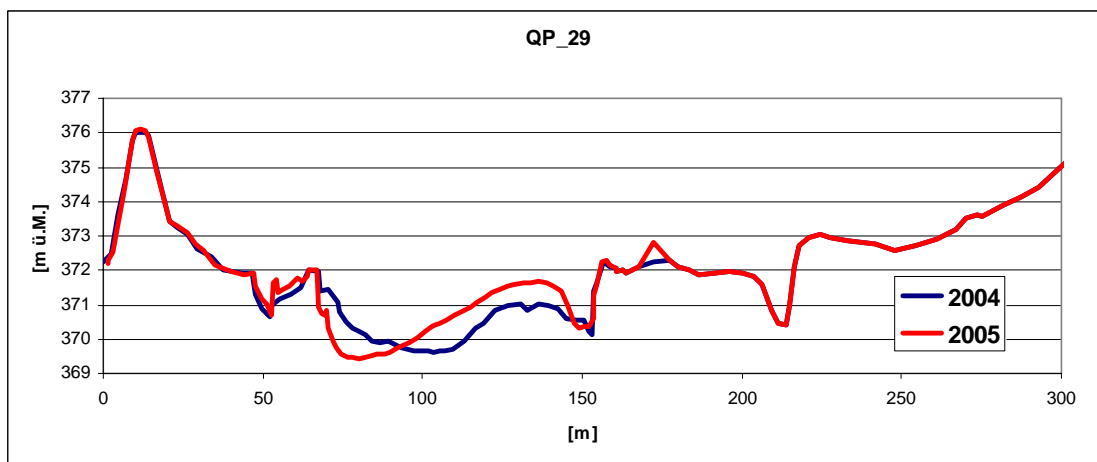


Abb. 4: Differenz der Sohlelagen im Bereich des Hauptgerinnes zwischen September 2005 und November 2004.

Im betrachteten Bereich wurde 7400 m^3 Material abgelagert. Die Abweichung gegenüber der Ausgangssohle beträgt im Maximum etwa $\pm 1.50 \text{ m}$. Im Querschnitt mit den grössten Sohlendifferenzen (siehe QP_29), fällt auf, dass die Flusssohle - entgegen der Erwartung - auf der Kurveninnenseite erodiert und auf der



Kurvenaussenseite Material abgelagert wird. An dieser Stelle zeigen sich auch die Grenzen einer eindimensionalen Betrachtung, die sich auf eine gemittelte Sohle abstützt. Obwohl hier die grössten Sohlveränderungen beobachtet werden, drückt sich dies in der mittleren Sohle nicht aus, weil sich die Erosionen und Auflandungen in Querrichtung kompensieren.

Abb. 5: Veränderung der Sohle im Querprofil QP_29 zwischen Nov. 2004 und Sep. 2005.

3. Das numerische Modell der Aufweitung bei Altikon

Das numerische Modell umfasst neben den zu lösenden Gleichungen die Anfangs- und Randbedingungen. Die *Anfangsbedingungen* bestehen aus der Topographie zum Zeitpunkt des Berechnungsbeginns und der zugehörigen hydraulischen Situation, d.h. dem Wasserstand und den Fliessgeschwindigkeiten in allen benetzten Rechenzellen.

An den Grenzen des Berechnungsgebiets müssen grundsätzlich für alle gesuchten Grössen *Randbedingungen* vorgegeben werden. Im vorliegenden Fall wird mit einer beweglichen Sohle gerechnet. Das heisst, dass an den Rändern neben den hydraulischen Kennwerten (Zufluss und Fliessgeschwindigkeit) auch die zugehörige Sohlenbewegung resp. die Geschiebezufuhr als Funktion der Zeit vorzugeben ist. Dabei sind vor allem die Vorgaben am Zuflussrand von entscheidender Bedeutung.

3.1 Hydraulische Randbedingungen

Die Qualität der numerischen Simulation soll anhand von Naturdaten überprüft werden. Dabei muss grundsätzlich die ganze Zeitperiode innerhalb derer das Hochwasser vom August 2005 stattfand und die von Messkampagnen flankiert wurde (Nov. 2004 bis Sep. 2005), simuliert werden. Um die Rechenzeit möglichst klein zu halten, werden nur jene Zeitabschnitte berechnet, in denen der Abfluss so gross ist ($Q > Q_0 = 30 \text{ m}^3/\text{s}$), dass auch wirklich Material transportiert wird. Damit lässt sich der zu betrachtende Zeitabschnitt von mehr als 11 Monaten auf etwa 14 Tage verkürzen. Abb. 6 zeigt den resultierenden Zuflusshydrographen, der aus den Stundenmittel der Messstation Andelfingen abgeleitet wurde. Das Hochwasser vom August 2005 umfasst in dieser Zeitreihe den Abschnitt vom Tag 10 bis 13.

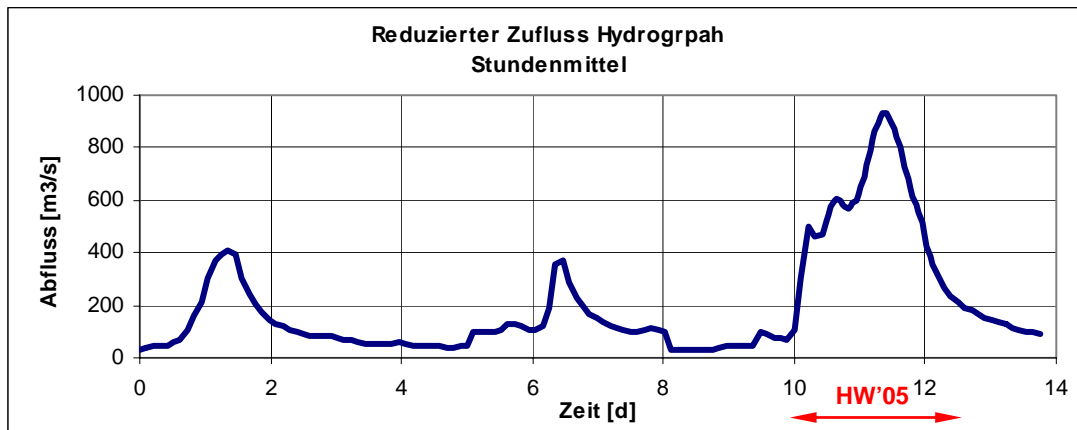


Abb. 6: Reduzierter Zuflusshydrograph, der für Simulation massgeblich war.

3.2 Sedimentologische Randbedingungen

Bei Modellen mit beweglicher Sohle besteht normalerweise die grösste Ungewissheit bezüglich der Bestimmung der sedimentologischen Randbedingungen. Dies gilt einerseits für die zeitliche Variation des Feststoffflusses und andererseits in grösserem Masse für die granulometrische Zusammensetzung, d.h. die Kornverteilung der Feststoffe. Zur Beschreibung des Feststofftransports wird oft zwischen dem Transport des Geschiebes (d.h. der groben Körnern, die sich in Sohlennähe bewegen) und jenem der suspendierten Partikel unterschieden. An der Thur hat der Suspensionstransport nur einen Einfluss auf die Geometrie der Vorländer. Aufgrund der Datenlage wird für die Simulation nur das Geschiebe berücksichtigt: zum einen weil im Hauptgerinne nur das Geschiebe eine bettbildende Wirkung erzielt und zum anderen weil sich die verwertbaren topographischen Aufnahmen auf dieses beschränken.

Zur Beschreibung des Geschiebes wird in alpinen Flüssen im Allgemeinen zwischen den charakteristischen Korngrössen der Deckschicht des laufenden Geschiebes, das sich über der Deckschicht bewegt, und des Unterschichtmaterials unterschieden. Das Material dieser drei Schichten wiederum besteht aus einem Gemisch von unterschiedlich grossen Körnern. Um Sortierprozesse und Deckschichtbildung modellieren zu können, muss die Kornverteilung durch eine gewisse Anzahl Kornklassen diskretisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Sensitivität der Simulationsergebnisse bezüglich der Beschreibung der Kornverteilung untersucht. Aus Platzgründen kann hier aber nicht darauf eingegangen werden. In Abb. 7 wird deshalb nur der totale Geschiebefluss als Funktion der Zeit, wie er für alle Rechnungen als massgeblich definiert worden ist, angegeben.

Die zu verschiedenen Zeitpunkten am Zuflussrand vermessenen Querprofile haben sich in ihrer Geometrie kaum verändert. Daraus lässt sich ableiten, dass für die betrachtete Zeitperiode an dieser Stelle der Geschiebetrieb gerade etwa der Transportkapazität entsprochen hat. Die massgebliche Transportkapazität wurde basierend auf einem Korndurchmesser von $d_m = 5\text{cm}$ und der Meyer-Peter-Müller Formel bestimmt. Der

verwendete Korndurchmesser entspricht etwa dem mittleren Korndurchmesser des Sohlenmaterials. Das Korn wurde so grob gewählt (das laufende Geschiebe hat ein $d_m = 2.5$ cm), damit das transportierte Volumen etwa der Menge entspricht, wie sie aufgrund der Geschiebehaushaltstudie für die Thur (Arge Fu Thur, 2005) erwartet werden kann.

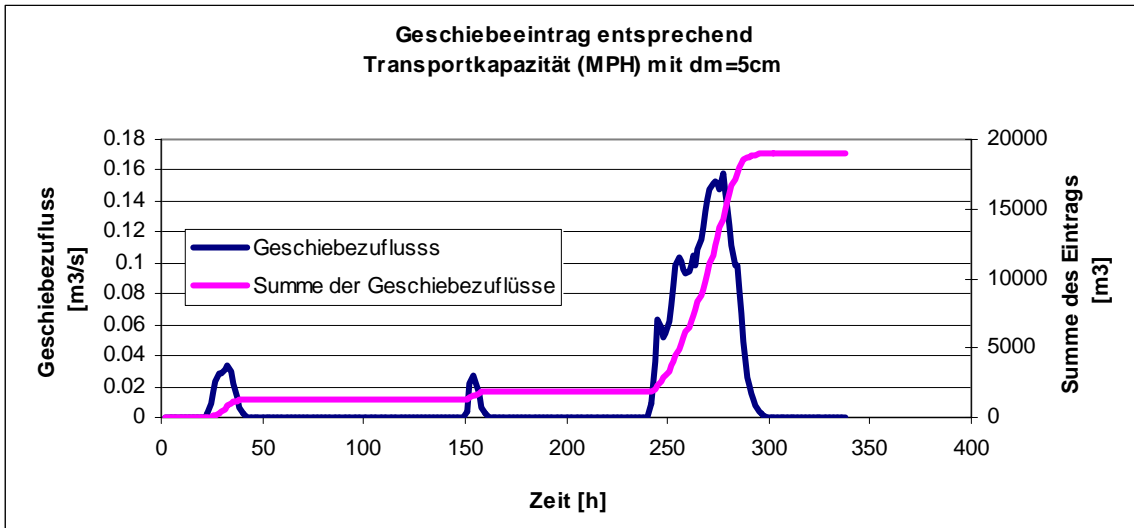


Abb. 7: Geschiebezufluss als Funktion der Zeit

Abb. 7 zeigt, dass mit den gewählten Parametern über eine relativ lange Zeitdauer kein Geschiebe zufließt. Innerhalb des Berechnungsgebietes, kann es aber - je nach lokaler Situation der hydraulischen Kennwerte - trotzdem zu Geschiebeumlagerungen kommen.

3.3 Software zur Lösung der Gleichungen

Um den räumlichen und zeitlichen Verlauf der hydraulischen und sedimentologischen Kenngrößen zu bestimmen wird auf der Basis der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls ein Gleichungssystem aufgestellt. Zur Lösung der Gleichungen wurden verschiedene Computerprogramme (Floris, 2dMb, BASEMENT) eingesetzt, die alle an der VAW entwickelt worden sind. Auf die die im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts neu entwickelte Software BASEMENT soll hier kurz eingegangen werden. Für die Details sei auf die Webseite www.basement.ethz.ch verwiesen, von der die Software inklusive der umfassenden Dokumentation umsonst herunter geladen werden kann.

Das Softwaresystem BASEMENT umfasst zurzeit zwei Module: BASEchain löst die eindimensionalen Gleichungen für die instationäre Berechnung von Strömungs- und Sedimenttransport in offenen Gerinnen und BASEplane macht dasselbe für eine horizontal zweidimensionale Situation.

Um die Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls formulieren zu können, wird das Berechnungsgebiet in einzelne Rechenzellen unterteilt. Die zeitliche Änderung einer gesuchten Grösse (z.B. der Wasserstand) wird nun bestimmt, indem die Flüsse über den Zellenrand bilanziert werden. In einem Zweiphasen-System (Wasser und Feststoffe) indem die Feststoffe aus mehreren Komponenten (Kornklassen) bestehen, die zudem in unterschiedlichen Transportmodi (Geschiebe und Suspension) transportiert werden, ist

es zweckmässig, die einzelnen Rechenzellen auch vertikal zu unterteilen um so die zu betrachtenden Kontrollvolumen genauer spezifizieren zu können.

Abb. 8 zeigt die vertikale Unterteilung einer einzelnen Rechenzelle in drei Kontrollvolumen. In der obersten Schicht werden die Massen und Impulserhaltung für das Wasser und die suspendierten Feststoffe formuliert. Daraus lassen sich die Abflusstiefe h , die spezifischen Abflüsse r und q sowie die Konzentrationen der Schwebstoffe C_g für jede Kornklasse g bestimmen.

In der mittleren Schicht, die auch als Active-Layer oder Austauschschicht bezeichnet wird, führt die Massenbilanz des Geschiebetriebs zu einer so genannten Sortiergleichung, mit der der volumetrische Anteil β_g der einzelnen Kornklassen g der obersten Schicht der Sohle beschrieben wird.

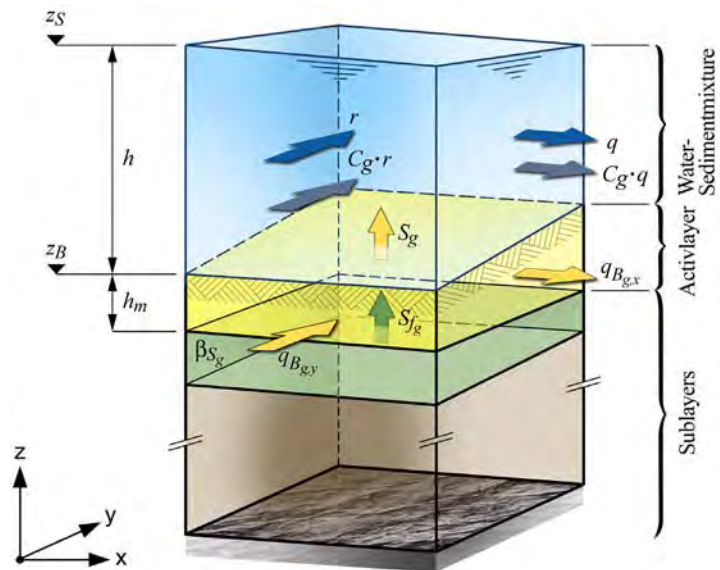


Abb. 8: Vertikale Unterteilung einer Rechenzelle

Summiert man die Massenbilanzen aller Bodenschichten, erhält man eine Bestimmungsgleichung für die Änderung der Solenkote z_B . Bei der Formulierung der Erhaltungsgleichungen werden zusätzliche Unbekannte via empirische Schliessbedingungen (z.B. Geschiebetrieb q_B , Suspensionseintrag S_g) eingeführt. Darauf kann hier aber aus Platz gründen nicht eingegangen werden.

4. Resultate der numerischen Simulation

4.1 1d-Modell

Um den Geschiebehaushalt eines Flusses analysieren zu können, sind normalerweise langfristige Simulationen (z.B. 50 Jahre), die sich meist über mehrere dutzende Kilometer erstrecken, durchzuführen. Mit der Leistung der Computer, die heute im Ingenieuralltag eingesetzt werden, führt dies zu Rechenzeiten, die nur den Einsatz von eindimensionalen Ansätzen erlauben. Die Modellvereinfachungen, die damit einhergehen, sind erheblich. Dies gilt insbesondere für Anwendungen wie sie hier vorgestellt werden. In der Aufweitung der Thur kann sich ein mäandrierendes oder verzweigtes Gerinne bilden, dessen Eigenheiten mit einem eindimensionalen Modell nur ganz grob, d.h. anhand der Entwicklung der mittleren Sohle beschrieben werden kann.

Das grundsätzliche Verhalten von Aufweitungen kann damit aber abgebildet werden. Der Vergleich der gerechneten und gemessenen mittleren Sohle in Abb. 3 zeigt die gute

Übereinstimmung. In den aufgeweiteten Bereichen stellt sich der erwartete Sohlenversatz ein. Während des Hochwassers vom August 2005 hat sich die mittlere Sohle auf einer Länge von mehreren hundert Metern um 30 bis 50 cm angehoben. Am unteren Ende der Aufweitungen kam es zu Eintiefungen, die im numerischen Modell etwas überschätzt worden sind. Insgesamt lässt sich aber feststellen, dass die Auswirkung der Hochwasserwelle auf die Aufweitung grundsätzlich richtig wiedergegeben wird. Das hydraulische Modell wurde durch Anpassen der durchströmten Flächen, mit denen die ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilung in Querrichtung berücksichtigt werden kann, kalibriert. Dies setzt voraus, dass Vergleichsmessungen vorhanden sind und dass der Modellierer eine gewisse Erfahrung hat. Wie weit das eindimensionale Modell ohne diese Voraussetzungen als Prognosetool eingesetzt werden kann, wäre noch zu untersuchen.

4.2 2d-Modell

Im zweidimensionalen Modell ist die räumliche Auflösung wesentlich grösser (4 mal 10m) als im eindimensionalen Modell, das auf Querprofilen im Abstand von 25 bis 50m basiert. Dies ermöglicht die Darstellung von einzelnen Bankstrukturen, wie die Darstellung der gerechneten Sohlendifferenzen in Abb. 9 zeigt. Die Resultate dieser Simulation basieren auf dem rudimentärsten Ansatz (Einkornmodell ohne Berücksichtigung der Deckschicht) für die Beschreibung des Sedimenttransports. Vergleicht man die berechneten Sohlveränderungen mit den Gemessenen von Abb. 4, so sieht man eine gute Übereinstimmung bezüglich der Lage der Erosions- resp. der Ablagerungsorte. Eine numerische Auswertung der aufsummierten Differenzen zeigt aber, dass in der Rechnung 14000 m³ Material abgelagert wurden, während es in Wirklichkeit nur eine Auflandung von 7400 m³ gab. Verteilt auf die ganze Fläche haben sich also 3.3 cm zu viel Material abgelagert.

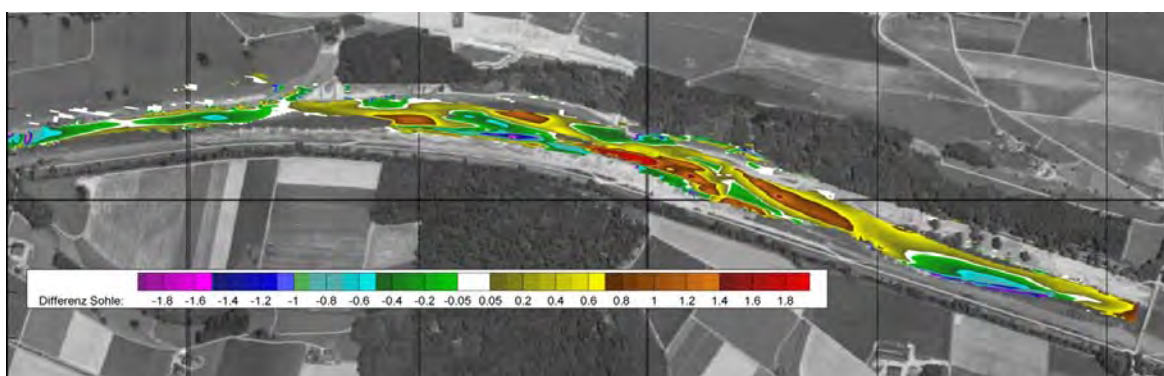


Abb. 9: Gerechnete Sohlendifferenzen zwischen September 2005 und November 2004 unter Annahme eines 1-Korn Modells und eines massgebenden Korndurchmessers von $d_m = 5\text{cm}$, der repräsentativ für das Sohlmaterial ist..

Der Grund dafür ist der für die Simulation verwendete relativ grobe Korndurchmesser von $d_m = 5\text{ cm}$. Dieser entspricht der mittleren Korngrösse in der Unterschicht, d.h. dem Sohlmaterial unter der Deckschicht. In Wirklichkeit trägt aber mehrheitlich das laufende Geschiebe ($d_m = 2.5\text{ cm}$), d.h. das Material das transportiert wird bevor die Deckschicht aufgerissen wird, zu den Gerinneveränderungen bei. Und da die Ablagerungstendenz

dieser feineren Fraktion wesentlich kleiner ist, verbleibt weniger Material in der Aufweitung.

Das Modell zur Beschreibung des Sedimenttransports kann verfeinert werden, indem mit dem mittleren Korndurchmesser des laufenden Geschiebes gerechnet und gleichzeitig die Wirkung der Deckschicht berücksichtigt wird. Dies kann durch die Vorgabe von zwei zusätzlichen kritischen Sohlschubspannungen erfolgen. Dabei entspricht die eine der kritischen Sohlschubspannung der Deckschicht während die andere repräsentativ für das Sohlmaterial sein soll. Übersteigt nun in einer bestimmten Rechenzelle die Strömungskraft den kritischen Wert für die Sohlschubspannung der Deckschicht, wird diese als aufgerissen betrachtet. Infolge wird der kleinere Wert, der für das Unterschichtmaterial massgebende ist, verwendet.

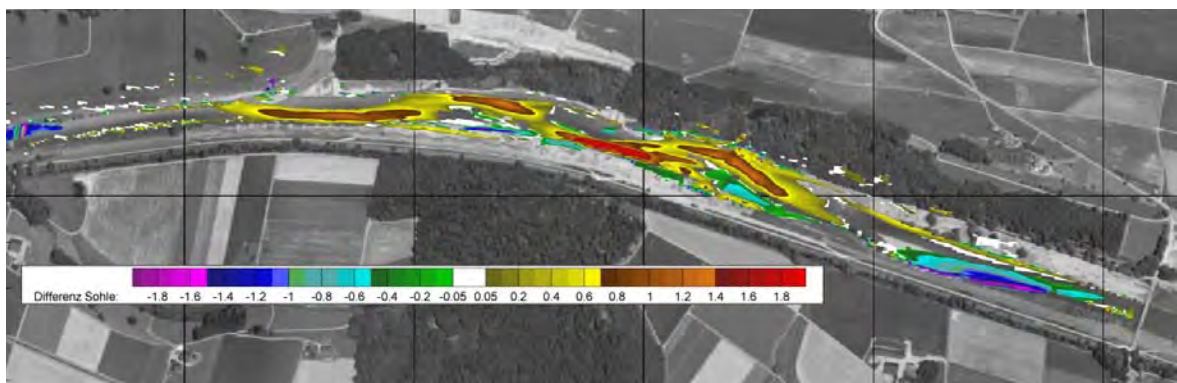


Abb. 10: Gerechnete Sohlendifferenzen zwischen September 2005 und November 2004 unter Berücksichtigung der Deckschicht und einem für das laufende Geschiebe repräsentativen Korndurchmessers von $d_m = 2.5\text{cm}$.

Abb. 10 zeigt die Resultate, die mit diesem Ansatz erzielt wurden. Die berechnete Sohlendifferenz von 6500 m^3 stimmt nun gut mit der Gemessenen überein. Die Erosion am unteren Ende der Aufweitung wird aber unterschätzt. Um dies zu verbessern, müsste die kritische Sohlschubspannung für die Deckschicht verkleinert und als Kompensation gleichzeitig der massgebende Korndurchmesser für das laufende Geschiebe etwas vergrößert werden.

Vergleicht man Abb. 11 und Abb. 10 fällt auf, dass sich die Ablagerungsmuster sehr ähnlich sind. Dieses Ergebnis hat sich auch bei der Variation von anderen sedimentologischen Parametern (unterschiedlicher Geschiebezufuss, Mehrkornmodell etc.) ergeben. Das bedeutet, dass die Gerinnemorphologie für den untersuchten Fall bei der zweidimensionalen Simulation wenig sensitiv auf die Eingabeparameter reagiert.

5. Schlussfolgerungen

Die Sohlveränderungen, die sich beim Durchgang einer Hochwasserwelle in einer Aufweitung ergeben, wurden anhand von Messungen und numerischen Simulationen für das Beispiel der Thuraufweitung bei Altikon bestimmt. Sowohl die eindimensionale Berechnung wie auch jene mit dem zweidimensionalen Ansatz zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Im Fall der zweidimensionalen

Rechnung reagieren die Ablagerungs- und Erosionsmuster nur wenig sensitiv auf die Variation der sedimentologischen Eingabeparameter. Daraus lässt sich schliessen, dass die Dynamik der Sohlentwicklung relativ zuverlässig wiedergegeben und das Modell allenfalls auch als Prognosetool eingesetzt werden kann.

Bibliographie

- Arge FuThur** (2005), *Geschiebehaushaltstudie Thur und Einzugsgebiet*, Schlussbericht.
- Bezzola G. R. und Hegg C.** (Ed.) 2007: *Ereignisanalyse Hochwasser 2005*, Teil1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Bundesamt für Wasser und Geologie** (2001), *Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitung 2001*, BAFU, Biel 2001, 72 S.
- Habersack, H.M., Koch, M. and Nachtnebel, H.-P.** (2000). *Flussaufweitungen in Oesterreich: Entwicklung, Stand und Ausblick*, Oesterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 52 (7/8): 143-153.
- Hunzinger, L.M. and Zarn, B.** (1997). *Morphological changes at enlargements and constrictions of gravel bed rivers*, 3rd Int. Conference of River Flood Hydraulics, Stellenbosch, South Africa, 5-7 Nov. 1997, 227-236. HR Wallinford.
- Marti, C. and Bezzola, G.R.** (2004), Morphologie in Flussaufweitungen, *Mitteilung VAW*, 184: 173-188.
- Requena, P., Bezzola, G.R., Minor, H.-E.** (2005), Aufweitungen in erodierenden Flüssen, *Wasser, Energie und Luft*, 97(7/8):183-189.
- Schmautz, M.** (2004), *Gravel river widening by bank erosion in a straight stretch of river – investigations on a numerical model*, *River Flow 2004* 1:99-107, Napoli.
- Zarn, B.** (1993). *Stabilising a riverbed by local widening – a case study of the river Emme*, *Sediment Transport Mechanisms in Coastal Environments and Rivers*, Le Havre, EuroMech 310: 388-396.

Verdankung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Rhone-Thur Projekts durchgeführt. Wir möchten uns bei allen beteiligten Partnern (EAWAG, WSL, LCH und VAW) für die Zusammenarbeit und insbesondere dem Bundesamt für Wasser und Geologie (heute BAFU) und dem Kanton Thurgau für die massgebende finanzielle Unterstützung bedanken.

Adresse der Autoren

Roland Fäh et al.
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
ETH Zürich
CH-8092 Zürich

+41 44 632 4116
www.vaw.ethz.ch
faeh@vaw.baug.ethz.ch

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Session 3

Synergies possibles pour des aménagements hydrauliques à buts multiples

-

Mögliche Synergien bei Mehrzweckprojekten

Président de session :

Tony Arborino, SRCE Valais Projet R3

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples : résolution du marnage artificiel et bénéfices écologiques, énergétiques et sociaux

Philippe Heller et Anton Schleiss

Résumé

D'importants travaux sont actuellement entrepris dans le contexte de la gestion des crues et de la renaturation des cours d'eau alpins. Pour bénéficier totalement du potentiel pluridisciplinaire de ces deniers, les projets entrepris doivent intégrer des aspects aussi larges que la production d'énergie, la gestion des crues, la revitalisation du cours d'eau et de ses berges, les loisirs aquatiques ainsi que l'intégration paysagère. L'intégration de ces différents domaines au sien d'un même aménagement à buts multiples génère un système dont l'étude est complexe. La recherche de solutions optimales qui produisent le plus de synergie doit ainsi s'effectuer en deux étapes successives, soit une analyse qualitative suivie d'une analyse quantitative. Cet article développe le modèle quantitatif ainsi que les outils d'optimisation qui intègrent la conception et la gestion de projets fluviaux à buts multiples. Une clé objective de répartition des coûts entre les principaux partenaires du projet est également présentée. La méthodologie complète est appliquée à un aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples sur le Rhône suisse alpin supérieur.

Abstract

Flood protection and ecological rehabilitation of alpine rivers require significant training works. In order to develop the still significant multipurpose potential of rivers, new projects have to integrate many aspects as energy production, flood routing, ecological rehabilitation, leisure activities and landscape integration. Such multipurpose projects have a high degree of complexity and have therefore to be assessed as a complex system. The identification of possible solutions has first to be based on a qualitative analysis. This article presents the second step based on the related quantitative model and the optimization tools which integrate conception and operation of multipurpose run-of-river projects. An objective key for cost sharing between the main partners of the project is also proposed. The developed methodology is applied on a multipurpose hydroelectric run-of-river project on the Upper Swiss Rhone River.

1. Introduction

Les échecs répétés ainsi que les difficultés liées à la mise en oeuvre de nouveaux ouvrages hydroélectriques dans les pays industrialisés montrent l'évolution du paradigme qui gère les rapports entre la société humaine et la nature. Les problèmes issus de ces ouvrages, souvent ignorés lors de la planification, ajoutés à la volonté populaire de restaurer un état naturel, nécessitent des analyses environnementales tant pour les nouvelles constructions que pour la restauration d'ouvrages ou encore la correction de cours d'eau. La prise en compte des aspects énergétiques et écologiques, joints aux aspects sécuritaires, financiers et socio-économiques, transforme la conception des ouvrages hydrauliques à buts multiples en un problème complexe. La conception, le dimensionnement et la gestion de tels aménagements nécessitent ainsi de nouvelles approches.

La méthodologie développée comprend quatre phases principales. Elle débute par une analyse qualitative du système formé par un aménagement fluvial à buts multiples et de ses interactions avec son environnement. Sur la base des résultats de cette analyse, les objectifs de l'aménagement sont alors formulés. Pour chacun de ces objectifs, la seconde étape consiste à développer un modèle quantitatif de simulation. Ces modèles permettent de quantifier la réponse de l'aménagement sur son environnement. La troisième étape est une génération de solutions optimales au sens de Pareto. Elle est basée sur les outils de simulation développés à l'étape précédente. Finalement, la dernière étape consiste en une série de filtres successifs qui aboutissent aux solutions synergiques ainsi qu'à une clé de répartition des coûts.

La réflexion est développée en parallèle à un cas d'étude sur le Rhône valaisan. Ce dernier est conditionné dans son état actuel par deux corrections successives (fin XIX^{ème} et milieu XX^{ème} siècle) ainsi que par l'exploitation des aménagements de production hydroélectrique à haute chute des vallées latérales. Sa morphologie tout comme son régime hydrologique sont donc fortement perturbés. Cet état offre un potentiel important de développement tant écologique que d'utilisation sociale (loisirs aquatiques notamment). La réflexion est basée sur un réservoir à buts multiples situé parallèlement au cours d'eau principal et alimenté essentiellement par l'aval (Schleiss, 2006). La Figure 1 illustre un tel aménagement.

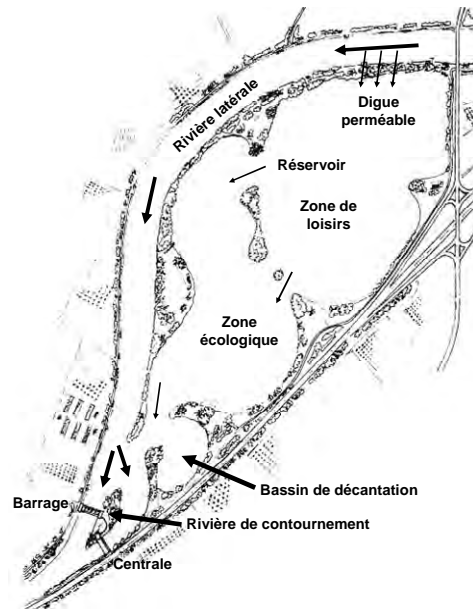


Figure 1 : Concept initial d'un réservoir à buts multiples (Bollaert et al., 2000)

2. Analyse qualitative

Fondé sur la dynamique des systèmes, ce travail débute par une modélisation qualitative du système complexe étudié. Il s'agit principalement d'en comprendre le fonctionnement interne par les relations qui existent entre ses différentes parties et son environnement. Cette compréhension permet de cerner, d'une part, les problèmes existants au sein du système actuel et, d'autre part, les attentes des principaux intervenants quant à des modifications possibles ou souhaitées.

La modélisation qualitative est effectuée à l'aide de la méthode de Gomez et Probst (1995). Cette méthode, cyclique, développée initialement pour des problèmes économiques, comprend cinq étapes distinctes. Il s'agit d'identifier le problème en le regardant sous différents angles, pour pouvoir comprendre les relations qui existent entre les différents partenaires du problème. Cette analyse doit permettre, par la mise en évidence des facteurs-clés, d'élaborer des solutions qu'il faut analyser par le biais d'indicateurs afin de pouvoir prendre les mesures nécessaires pour réaliser la solution la plus prometteuse. La réalisation génère une nouvelle situation qui engendre de nouveaux problèmes. La Figure 2 illustre les différentes étapes de la méthode.

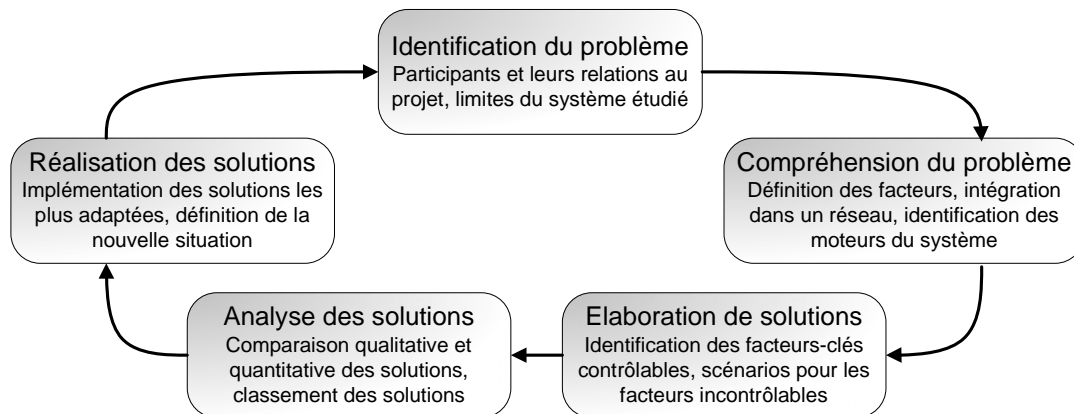


Figure 2 : Les cinq étapes de la méthode de Gomez et Probst (1995)

Pour permettre une modélisation qualitative physique du système étudié avec la méthode proposée par Gomez et Probst (1995), des adaptations sont nécessaires. Il faut, d'une part, se limiter à une approche physique exclusivement par opposition à la pluralité des approches logiques possibles. D'autre part, il est nécessaire d'étendre le concept d'activité et de réactivité des facteurs (profondeur d'agrégation des influences). Les développements liés spécifiquement au logiciel PACEVs (Heller, 2006) apportent en plus la notion de distribution spatiale (rayon d'action) et transforme la notion l'activité (ou réactivité) en notion d'impact (distinction des effets désirables de ceux indésirables).

Afin de valider les extensions de la méthode, une analyse de sensibilité est menée sur la base du cas d'étude. Elle porte, d'une part, sur le modèle lui-même avec l'intensité des relations choisies par les experts et, d'autre part, sur la profondeur d'agrégation des influences. Cette analyse conclut que la méthode est applicable de manière fiable sur les facteurs principaux du système. Une réserve est cependant émise pour le classement des facteurs secondaires du système (facteurs de moindre importance).

L'application de la méthode identifie un classement des différents facteurs dans trois groupes distincts. Le premier groupe rassemble les facteurs liés au dimensionnement, le second groupe les facteurs liés à la gestion et le dernier groupe les facteurs qui sont les indicateurs du projet. Dans chacun des trois groupes, les facteurs-clés sont mis en évidence. Ce sont, pour le premier groupe, les dimensions du réservoir, le débit équipé de la centrale ainsi que celui de la rivière de contournement. Le second groupe est réduit à une seule variable de gestion, soit le débit sortant de l'aménagement. Enfin, le dernier groupe relève l'écologie aval, les aspects financiers, socio-économiques, énergétiques ainsi que l'impact sur la nappe phréatique (Heller et al., 2005a).

L'étude qualitative conclut sur la nécessité de développer une approche quantitative. Elle apporte les bases nécessaires aux différents modèles de simulation et distingue clairement les systèmes décisionnel et physique de l'aménagement. Cette distinction permet de casser la complexité du système. Le lien entre ces deux sous-systèmes est constitué par le « débit sortant », appelé variable « pivot ».

3. Analyses quantitatives

Les aspects décisionnels étant traités directement dans la partie méthodologie, les aspects quantitatifs ou physiques peuvent être abordés par des modèles partiels de simulation. Afin de respecter les différents aspects mis en lumière par l'analyse qualitative, autant d'outils de simulation que de thèmes abordés sont développés. Ce sont tout d'abord la gestion ordinaire de l'aménagement ainsi que la gestion en situation de crue. Ces deux outils permettent de déterminer le fonctionnement hydraulique, c'est-à-dire le débit écoulé à l'aval de l'aménagement. Les autres outils de simulation sont directement dépendants de la gestion. Les aspects hydrauliques (du réservoir), énergétiques, thermiques, écologiques et sociaux découlent en effet uniquement, pour un aménagement donné, des choix liés à la gestion. La simulation financière est en partie influencée par les outils précédents (revenus liés au fonctionnement de l'aménagement) et en partie dépendante de l'aménagement lui-même (investissement initial). Les différents modules de simulation sont représentés à la Figure 3 avec leur articulation relative.

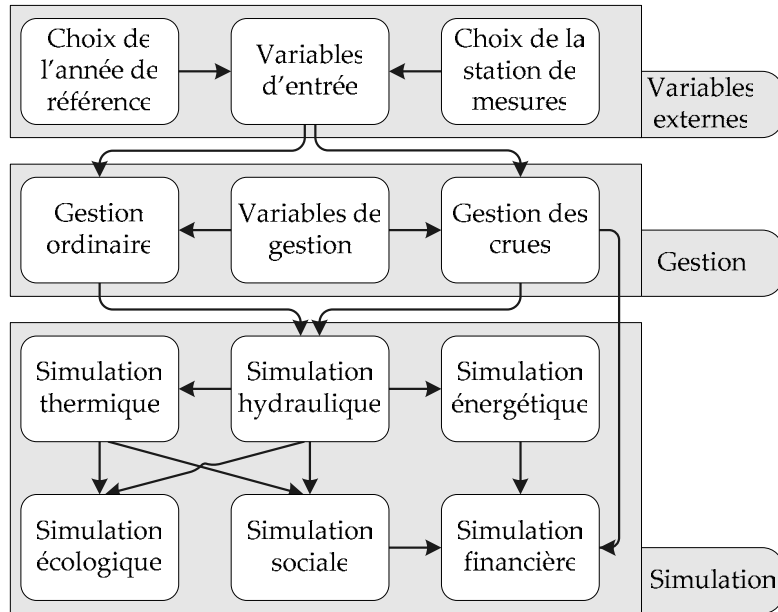


Figure 3 : Articulation des modèles de simulation

3.1 Modèle de gestion ordinaire

Le modèle de gestion ordinaire détermine pour chaque heure le débit aval optimal qui sort du réservoir (modèle applicable en dehors des situations de crues). Il est utilisé en permanence à l'exclusion des situations de crue. Il est basé sur une prévision des apports hydrauliques à 96 heures pour une planification de 48 heures. Le modèle calcule le débit aval de manière à maximiser, en tout temps, le taux de remplissage de la retenue. Il répond à l'équation suivante :

$$\text{Max} \left(\sum_{t=1}^{96} \frac{H_{res}(t)}{H_{res,max}} \right) \quad (1)$$

où $H_{res}(t)$ est le niveau du plan d'eau du réservoir à l'instant t et $H_{res,max}$ le niveau maximal du réservoir. L'objectif mathématique du modèle permet de maximiser la production d'énergie (maximisation de la chute) tout stabilisant le niveau du réservoir (minimisation des battements) et en maximisant ainsi l'utilité sociale de ce dernier. Le modèle intègre l'objectif premier de la gestion ordinaire, soit de tranquilliser le débit aval, sous forme de contrainte. Il limite les variations du débit aval à l'aide d'un gradient (Halleraker et al., 2003) et d'une amplitude maximaux. De la sorte, il respecte, pour la rivière aval, les attentes écologiques liées au réservoir. L'optimisation du débit aval est calculée par le logiciel *AMPL* (Fourer et al., 2003). La Figure 4 illustre la gestion proposée pour une semaine hivernale typique.

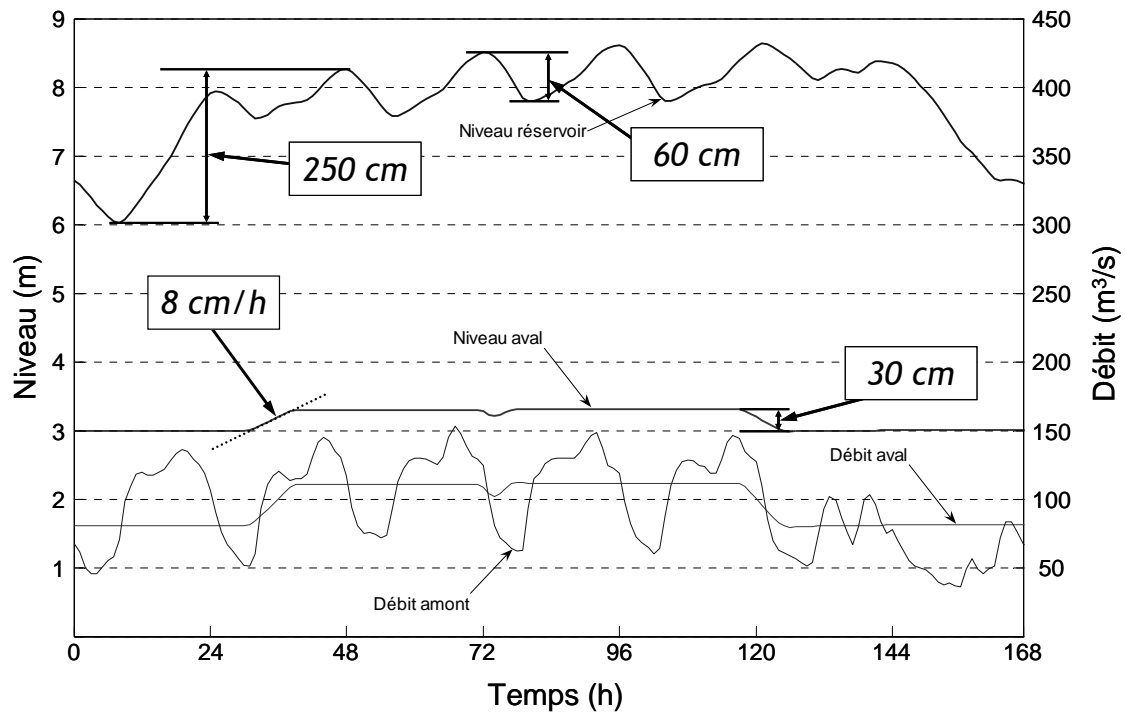


Figure 4 : Semaine hivernale avec la gestion optimale proposée

Les valeurs des contraintes (amplitude et gradient) sont définies par des variables qui constituent les leviers du modèle de gestion ordinaire. Elles peuvent être optimisées en même temps que les paramètres géométriques du réservoir (c.f. paragraphe 4). Avec les valeurs proposées pour la gestion (gradient à 8 cm/h et amplitude à 30 cm en hiver et 12 cm/h et 40 cm en été), le modèle permet une atténuation du marnage fort (supérieur à 10 cm/h) supérieure à 80 % pour une perte énergétique inférieure à 10 % (Heller et al., 2006). Ces limites permettent de reconstituer des conditions écologiques quasi naturelles.

3.2 Modèle de gestion de crue

Le modèle de gestion des crues poursuit un objectif double. Il établit tout d'abord, selon les possibilités de gestion de l'aménagement pendant les situations de crue, les règles relatives au fonctionnement de ce dernier (Heller et al., 2005b). Ensuite, pour les différents modèles de fonctionnement, il établit l'influence de la rétention sur la statistique des débordements aval. Par ce biais, il permet la comparaison financière entre l'augmentation de la capacité aval et l'augmentation de la rétention. Sur la base d'un risque résiduel constant, le modèle permet de calculer l'abaissement potentiel des digues aval pour un réservoir donné. La Figure 5 illustre l'abaissement potentiel pour différentes tailles de réservoir possible.

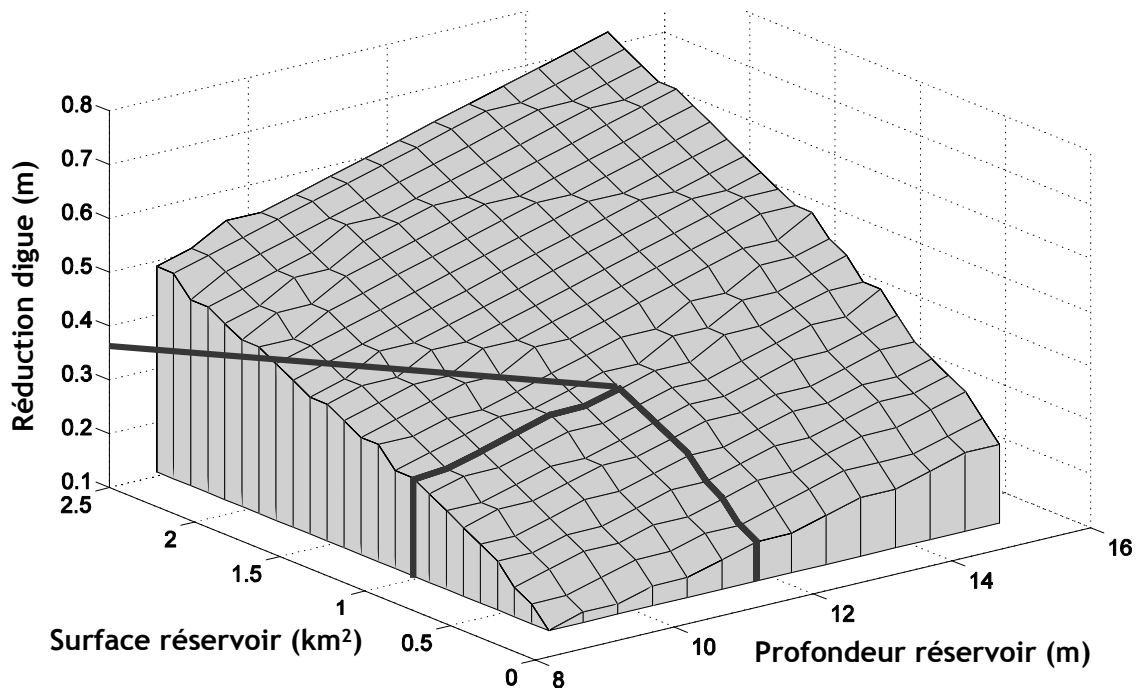


Figure 5 : Abaissement potentiel des digues aval pour différents volumes de rétention

Les lignes noires illustrent un volume de rétention composé d'un réservoir de 1 km² et 8.5 m de profondeur avec un volume d'épanchement de 1 km² et 3 m de profondeur. Ce volume conduit, pour le Rhône valaisan à la hauteur de Branson, à une réduction potentielle de la hauteur des digues aval de 36 cm. Cet abaissement peut être estimé financièrement à une valeur de 40 Mio CHF.

3.3 Modèle hydraulique

Le modèle de fonctionnement hydraulique du réservoir répond à la seule équation de la continuité pour décrire l'effet de la rétention. Il admet une relation hauteur-volume du réservoir (et de la courbe de remous de la rivière amont) qui fixe, en fonction du volume présent, le niveau dans le réservoir. Le modèle hydraulique répond aux équations suivantes :

$$V_{res}(t+1) = V_{res}(t) + 3600 * (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) \quad (2)$$

$$H_{res}(t+1) = f(V_{res}(t+1)) \quad (3)$$

Les résultats du modèle hydraulique sont implicitement contenus dans les résultats des modèles de gestion.

3.4 Modèle énergétique

Le modèle énergétique, développé pour des turbines Kaplan a pour objectif de déterminer la production annuelle d'énergie en fonction des machines hydromécaniques installées. Le modèle doit donc tout d'abord déterminer les principaux paramètres de dimensionnement de ces dernières (diamètre de la roue et vitesse de rotation) pour ensuite en déduire la production. Le dimensionnement est effectué sur une colline adimensionnelle adaptée aux basses chutes (jusqu'à 10 m environ). A cause de la forte variabilité du débit turbiné comme de la chute disponible (conséquence du modèle de gestion de l'aménagement), le dimensionnement des machines hydromécaniques

requiert une optimisation propre. Cette optimisation est effectuée de manière itérative sur les différents diamètres possibles de la turbine à hélice de même que sur les vitesses de rotation relatives. La Figure 6 illustre la variabilité de la production annuelle du groupe principal en fonction des différents diamètres de la machine et de la vitesse de rotation optimale pour chacun d'eux. Le critère de choix du diamètre est basé sur la moyenne mobile de la dérivée (taux limite fixé à 0.2 %).

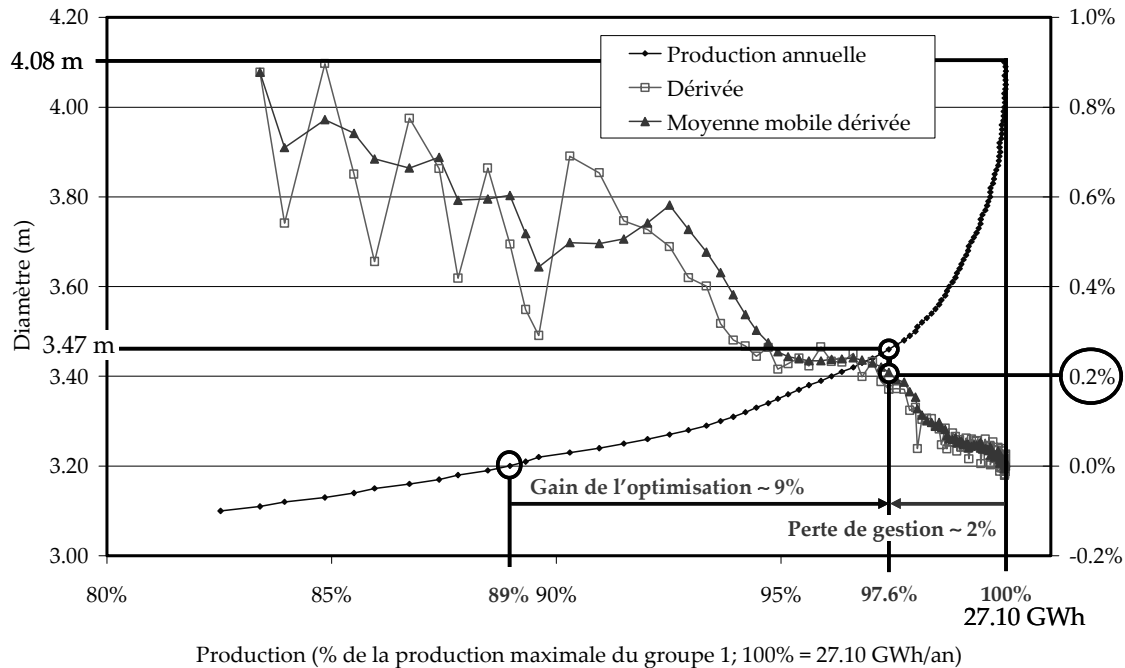


Figure 6 : Variabilité de la production énergétique en fonction du diamètre de la turbine

Dans le cas du Rhône valaisan à Branson, l'optimisation énergétique conduit à un diamètre de la machine d'environ 3.5 m. Une étude de sensibilité sur les différents paramètres de l'aménagement (surface, hauteur, débit équipé) aboutit à un rendement global unique de toute la chaîne énergétique à hauteur d'environ 85 % (ratio entre énergie brute et énergie électrique).

3.5 Modèle thermique

Le modèle thermique simule l'évolution thermique du réservoir uniquement. Toutefois, avec l'hypothèse d'un brassage parfait du débit aval, il permet également de déterminer l'évolution de la température du cours d'eau aval. Basé sur une cellule unique, il calcule la température moyenne du réservoir. Le modèle est basé sur les différents flux thermique du réservoir en interaction avec son environnement (flux solaire direct, émission des corps chauds, conduction du sous-sol, conduction/convection de l'air et évaporation du plan d'eau) ainsi que sur les apports hydrauliques. Il est motivé tant par les aspects écologiques que sociaux (utilisation du réservoir à des fins de loisirs aquatiques et risque de formation de brouillard). La Figure 7 illustre l'évolution de la température simulée du cours d'eau aval et du réservoir pour l'année 1993.

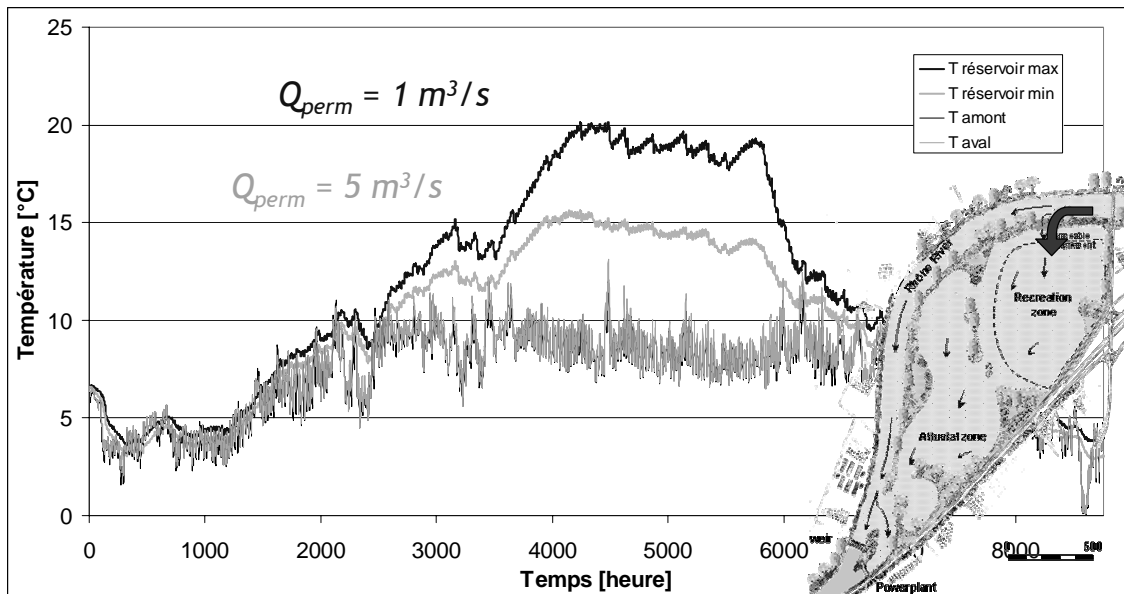


Figure 7 : Evolution de la température du cours d'eau aval et du réservoir en fonction du débit à travers la digue perméable, année 1993

Les résultats de simulation montrent une influence négligeable sur la rivière aval (courbes grise et noire quasi superposées). La température moyenne du réservoir peut évoluer en été entre 15 et 20°C selon le débit qui transite à travers la digue perméable.

3.6 Modèle écologique

Le modèle écologique est développé dans le cadre d'une thèse parallèle (Pellaud, 2007). Il s'applique uniquement à des systèmes lotique (exclusion des systèmes lentiques comme le réservoir lui-même). Il permet de déterminer en fonction de la morphologie du cours d'eau et du régime hydrologique (impact de la réduction du marnage) l'évolution de la richesse prédite pour les invertébrés (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères) ainsi que la surface utile pour quatre guildes de faune piscicole (mouille, radier, berge et cours principal).

3.7 Modèle social

Le modèle social poursuit un objectif double. Il estime tout d'abord la valeur financière d'une visite sur le site du réservoir effectuée à des fins de loisirs aquatique. Cette valeur est estimée avec la méthode du coût du transport basée sur une enquête réalisée sur l'ensemble du Valais. Compte tenu des activités nautiques possibles sur le réservoir, la valeur financière est estimée à 46 CHF par visite. Dans un second temps, le modèle estime la fréquentation estivale du réservoir. Elle est déduite à partir de la fréquentation d'un site existant (Ile de Sion) lui-même calé sur le chiffre d'affaire du restaurant de ce site (restaurant des Iles de Sion). Compte tenu des activités nautiques possibles, du déplacement géographique (proximité de la population résidente) et d'une fonction de préférence qui considère les battements du réservoir, la température de l'air et celle de l'eau, le modèle estime la fréquentation journalière du site. La Figure 8 illustre cette fréquentation simulée pour la période estivale de l'année 1993.

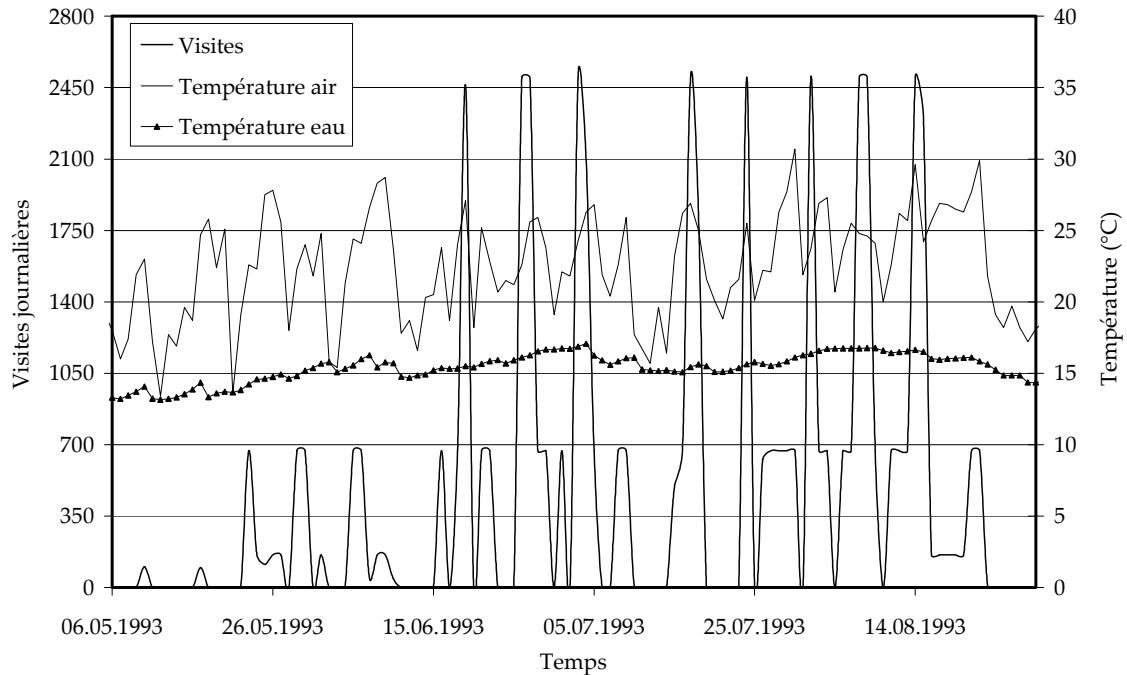


Figure 8 : Fréquentation simulée du site du réservoir à des fins de loisirs pendant l'été 1993

Annuellement, le modèle prédit un total qui avoisine les 55'000 visites. Avec le montant unitaire de 46 CHF, l'aménagement représente une valeur annuelle d'environ 2.5 Mio CHF.

3.8 Modèle financier

Le modèle financier est basé sur un ensemble de prix unitaires qui sont multipliés aux quantités requises pour la construction de l'aménagement. Les quantités requises sont calculées à partir des variables de dimensionnement. Les facteurs d'échelle liés à la variation des prix unitaires par rapport aux quantités ne sont pas considérés. Le coût total est calculé par la sommation de onze coûts partiels. Ce sont :

1. le réservoir : achat du terrain et traitement de la surface totale;
2. la zone d'épanchement : achat du terrain et traitement de la surface des digues relatives;
3. les digues : coût volumique des digues à construire pour le réservoir, la zone d'épanchement et la surélévation amont (courbe de remous de la rivière amont);
4. les contre-canaux : coût linéaire à construire sur le périmètre du réservoir;
5. le barrage en rivière : coût volumique du béton à mettre en place et coût de la masse d'acier composant les vannes;
6. la centrale hydroélectrique : coût unitaire variable en fonction de la puissance installée;
7. la rivière de contournement : coût linéaire de la rivière à créer avec une pente moyenne constante;
8. les installations de chantier : pourcentage sur les sept premiers coûts (10 %);
9. l'intégration architecturale et écologique : pourcentage sur les coûts 3 à 6 (5 %);
10. les frais d'étude et d'imprévus : pourcentage des coûts 1 à 9 (15 %);
11. les frais financiers (inflation et intérêt intercalaire pendant la construction) : pourcentage des coûts 1 à 10.

La modularité offerte par le modèle financier permet de modifier facilement la configuration de l'aménagement et d'en calculer son coût. Cette possibilité est largement utilisée pour les optimisations partielles (cf. paragraphe 4).

3.9 Résultats de simulation

Les résultats de simulation permettent tout d'abord de quantifier les produits délivrés par un aménagement donné pour une gestion donnée. Ils apportent ainsi une réponse quantifiée aux conséquences (positives ou négatives) du projet. En ce sens, l'ensemble des simulations constitue un outil adéquat pour évaluer l'impact des mesures techniques (dimensionnement et gestion) du projet sur son environnement.

Les résultats de simulation permettent également de comparer les différents aménagements ainsi que leurs différentes gestions possibles. Moyennant des fonctions d'agrégation, les résultats bruts de simulation peuvent être réduits à quelques valeurs significatives. Ces valeurs représentent un projet donné. Par itération, il devient ainsi possible d'améliorer le projet initial, tout au moins de le faire évoluer dans la direction souhaitée.

Ces outils de simulation constituent un premier support d'aide à la décision. Dans les limites de validité des modèles développés, ces outils apportent une réponse indiscutable des conséquences physiques d'un projet hypothétique. Etant donné la rapidité de calcul (de l'ordre de la demi-minute), il serait même envisageable d'exploiter ce potentiel d'adaptation en *live* au cours d'une négociation.

Selon la définition même du compromis, *accord obtenu par concession réciproque* (Larousse, 1994), cet outil d'aide à la décision permet d'aboutir à des solutions de cette nature. Il permet, en effet, d'accorder des points de vue divergents à la condition que chaque partenaire accepte de réduire ses prétentions.

4. Optimisation et génération de solutions

Passer du compromis au consensus requiert une étape supplémentaire. C'est l'objectif principal de la méthodologie développée. Habituellement, le consensus est défini comme un *accord et un consentement général (tacite ou exprès) du plus grand nombre* (Larousse, 1994). Dans ce travail, il est considéré comme une solution qui ne désavantage aucun des partenaires ce qui conduit au consentement général. Selon la Figure 9, les solutions de consensus dépassent le compromis en accordant de meilleures performances pour au moins un des objectifs. Elles appartiennent en quelque sorte au même genre que les solutions de Pareto. Les solutions synergiques cherchent à dépasser le consensus.

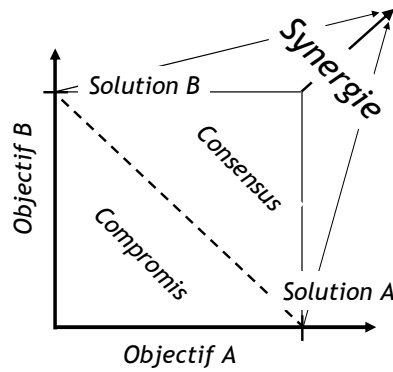


Figure 9 : Solutions de compromis, de consensus et de synergie

La méthodologie développée est basée sur un ensemble de procédés d'élimination de solutions potentielles pour ne retenir que les solutions réalistes. Elle considère, dans un premier temps, l'ensemble des solutions potentielles. Ce nombre de solutions correspond à la combinatoire des différentes variables de décision. S'il y a au moins une variable continue, ce nombre est théoriquement infini.

Le premier filtre est implicitement contenu dans le vecteur de contraintes qui limite l'espace admissible des variables de décision. Ainsi, pour autant que ces contraintes reproduisent les contraintes naturelles d'un site, les solutions restantes correspondent toutes à des solutions techniquement réalisables.

Le second filtre est réalisé par une optimisation multi-objective. Le résultat de cette optimisation est un ensemble de solutions théoriquement optimales. Cette optimisation nécessite, pour faciliter la comparaison des objectifs, des optimisations partielles. Ces optimisations partielles (mono-objectives) établissent, pour chaque objectif, des clés de transfert entre l'investissement potentiel optimal et les produits délivrés. Par addition des investissements potentiels, il devient ainsi possible de comparer les différents objectifs d'un même aménagement entre eux ou vis-à-vis du coût total. Cette comparaison est illustrée à la Figure 10.

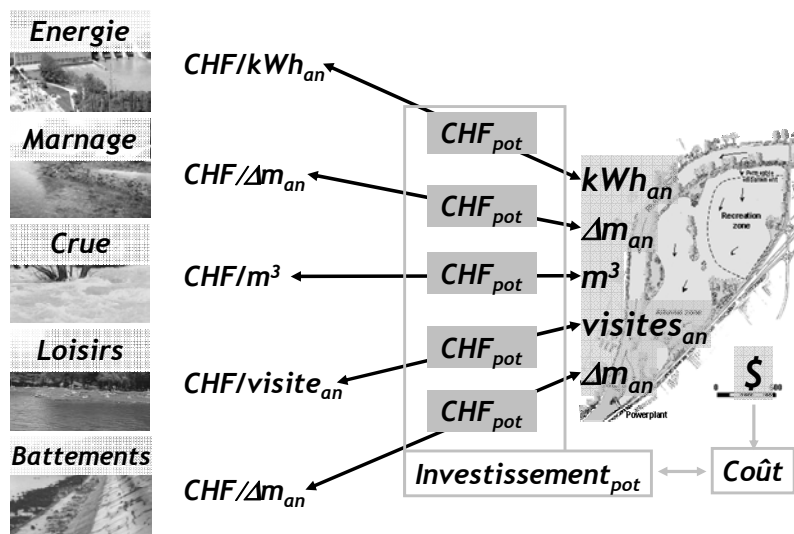


Figure 10 : Clé de transfert par objectif et comparaison de l'investissement potentiel au coût total

Le troisième filtre élimine les solutions optimales qui ne correspondent pas à une solution de consensus par rapport à au moins une solution optimale partielle. Ce filtre est appelé synergique. Il permet ainsi de dépasser les solutions consensuelles. Il consiste à éliminer les solutions dont le coût dépasse l'investissement potentiel. L'indicateur de synergie, I_{syn} , est défini par l'équation :

$$I_{syn} = \frac{\left(\sum_{\text{objectifs}} P_i \cdot C_{u,i} \right) - C_{total}}{C_{total}} \quad (4)$$

où P_i est la quantité physique délivrée de l'objectif i , $C_{u,i}$ le coût unitaire optimal du même objectif et C_{total} le coût total de l'aménagement à buts multiples. Une solution est dite synergique si son indicateur de synergie, I_{syn} , est positif.

Le quatrième filtre est double. Il élimine les solutions synergiques qui ne correspondent pas aux attentes des partenaires par défaut de production ou par excès de coût. La Figure 11 illustre l'ensemble de la méthodologie développée par son organigramme fonctionnel.

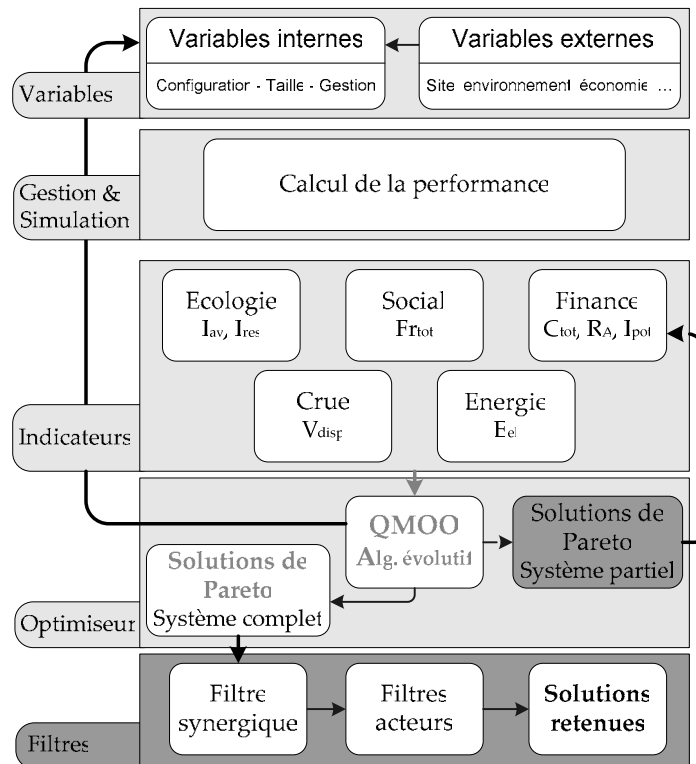


Figure 11 : Organigramme de la méthodologie développée

Les solutions restantes sont donc des solutions techniquement réalisables, optimales au sens de Pareto, synergiques, acceptables quant à la production de chacun des objectifs et payables par chacun des partenaires. Ces solutions constituent assurément une base de négociation autrement plus élaborée que celles basées sur la seule simulation. Elle présente par ailleurs l'avantage, pour un site donné, de n'inclure les aspects purement subjectifs qu'à la fin du processus. Il est donc très facile de modifier les paramètres du quatrième filtre pour obtenir de nouvelles solutions.

5. Application au cas d'étude

La modélisation qualitative d'un aménagement à buts multiples hypothétique sur le Rhône valaisan à Riddes permet de distinguer six thèmes principaux. Ce sont les aspects hydrauliques, les aspects énergétiques, les aspects socio-économiques, les aspects liés à la nappe phréatique et finalement les aspects écologiques. Pour chacun de ces six aspects, les facteurs-clés sont mis en évidence et attribués à l'une des trois catégories (dimensionnement, gestion, indicateur).

Analysé dans son ensemble, le système relève tout d'abord les principaux facteurs de dimensionnement, à savoir ceux qui touchent directement le réservoir (hauteur et surface), la passe à poisson (débit) et la production énergétique (débit équipé). Par agrégation, les variables de gestion sont réduites au seul débit sortant de l'aménagement. Cette variable constitue également la variable "pivot" entre les systèmes de modélisation physique et logique. Finalement, les indicateurs regroupent l'ensemble des impacts du système tant pour les aspects écologiques, sociaux, financiers, énergétiques ainsi que ceux liés à la nappe phréatique.

L'ensemble des résultats qualitatifs forme l'étape initiale de la modélisation quantitative. Ils définissent les modèles nécessaires de simulation (hydraulique, énergétique, thermique, écologique, social et financier), les contraintes à respecter (vecteur des contraintes pour les variables de décision qui inclut implicitement la nappe phréatique) ainsi que l'articulation des modèles entre eux (résolution optimisée de la gestion comme étape initiale).

L'optimisation globale est développée sur la base des simulations. Elle utilise l'algorithme d'optimisation *QMOO* (Leyland, 2002) en lui ajoutant deux fonctionnalités (mise en réseau d'ordinateurs, prise en compte de résultats de simulation qui n'entrent pas dans l'optimisation). Les résultats issus de *QMOO* sont des solutions situées sur des courbes de Pareto. L'investissement est compris entre 100 et 1'000 Mio CHF. Les revenus bruts sont compris entre 100 et 500 Mio CHF.

L'application des trois filtres (synergique, acteurs-inférieur, acteurs-supérieur) permet d'éliminer l'essentiel des solutions optimales. L'agrégation finale exécutée manuellement permet d'aboutir à une solution unique. Cette solution peut être caractérisée par un réservoir légèrement supérieur à 0.6 km², une profondeur d'eau à l'amont du barrage située vers 8.0 m (chute utile d'environ 6.5 m) et un débit équipé de 250 m³/s. L'investissement total de cet aménagement est d'environ 180 Mio CHF et l'investissement potentiel de 198 Mio CHF. Cette solution offre donc un indicateur de synergie d'environ 10 % (synthèse référence 1993). Les différentes solutions trouvées (2 pour 1993, 2 pour 1999 et la synthèse pour les deux années) sont représentées graphiquement à la Figure 12.

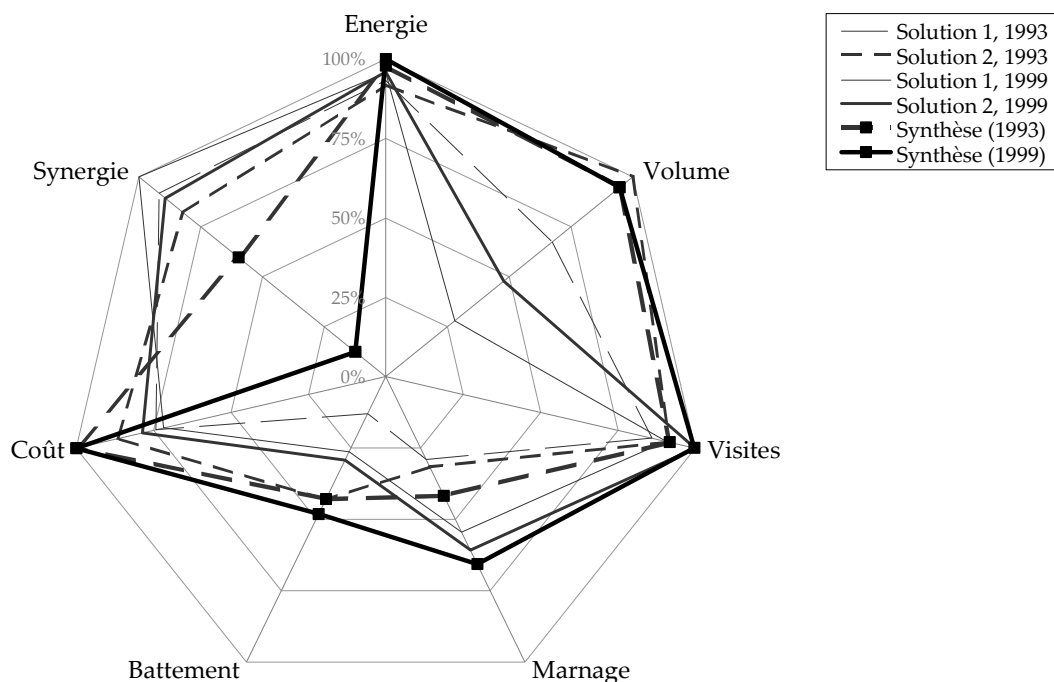


Figure 12 : Représentation graphique des différentes solutions du cas d'étude de Riddes pour les deux années étudiées

La Figure 12 illustre clairement le lien qui existe entre les trois axes « volume-coût-synergie ». A cause du coût élevé pour la construction des digues, l'augmentation du volume (de celui du réservoir et dans une moindre mesure de celui de la zone d'épanchement) conduit de manière importante à une élévation du coût total. En conséquence, l'indicateur de synergie baisse dans une proportion similaire. Ainsi, le classement des solutions sur l'axe du volume correspond à celui sur l'axe du coût mais est inversé sur l'axe de la synergie. A cause de la variabilité des valeurs des paramètres de gestion, le classement précédent n'apparaît pas aussi clairement sur les deux axes « marnage » et « battement ». Enfin, les axes « énergie » et « visite » montrent peu de sensibilité pour les différentes variantes.

6. Conclusion

Ce travail de recherche, mené au sein d'une équipe pluridisciplinaire composée d'écologues, d'architectes, d'ingénieurs civils et mécaniciens, de producteurs d'hydroélectricité et de services étatiques, a montré la pertinence de l'approche choisie qui a conduit à la faisabilité des solutions proposées. Par ailleurs, la modularité des méthodes développées (analyse qualitative, gestion du marnage, calcul probabiliste de l'impact de la rétention sur les crues, modèle de dimensionnement des turbines, optimisations partielles et complètes) offre de larges possibilités pour des utilisations partielles, pour des applications à d'autres ouvrages ou pour des développements ultérieurs.

La méthodologie complète, développée en 12 étapes depuis l'analyse qualitative jusqu'aux solutions finales, est appliquée à un cas d'étude sur le Rhône valaisan. Les solutions trouvées permettent de proposer un projet d'aménagement à buts multiples capable de satisfaire aux exigences des différents acteurs tout en générant une économie d'investissement de l'ordre de 10 %. Cette réduction, appelée gain synergique, est

calculée par rapport à la somme des investissements optimaux des aménagements à but unique réalisés séparément. Les solutions trouvées nécessitent un investissement compris entre 150 et 180 Mio CHF. Elles permettent de produire 44 GWh/an d'électricité, de réduire le marnage actuel à 40 % (calcul selon l'indicateur dont l'effet est la restauration d'un régime hydrologique quasi naturel) et offre une utilité sociale calculée à 55'000 visites annuelles. Le volume disponible pour la gestion des crues oscille entre 5 et 8 Mio m³.

Absorber plus de 80 % du marnage fort (supérieur à 10 cm/h) avec une perte énergétique inférieur à 10 %, justifier l'impact financier de la rétention sur les crues, optimiser le dimensionnement des machines hydroélectriques dans le cas d'une double variabilité forte (débit et chute), concevoir et dimensionner de manière intégrée des solutions qui permettent, pour des aménagements à buts multiples, des économies pour chacun des objectifs constituent les principaux résultats de ce travail de recherche.

Bibliographie

- Bollaert, E., Irniger, P., and Schleiss, A.** (2000). *Management of sedimentation in a multiple reservoir in a run-of-river powerplant project on an Alpine river*, Proc. HYDRO 2000, Bern, Switzerland, 183-192.
- Fourer, R., Gay, D. M., and Kernighan, B. W.** (2003). *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*, Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company, USA.
- Gomez, P., and Probst, G.** (1995). *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens*, Paul Haupt, Bern, Switzerland.
- Halleraker, J. H., Saltveit, S. J., Harby, A., Arnekleiv, J. V., Fjeldstad, H.-P., and Kohler, B.** (2003). *Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (salmo trutta) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream*, River Resources Application, 19, 589-603.
- Heller, P., Schleiss, A. J., and Bollaert, E.** (2005). *Potential synergies of multipurpose run-of-river hydroelectric powerplants*, XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 2121-2130.
- Heller, P., Bollaert, E., and Schleiss, A.** (2005). *Optimal reservoir use of a multipurpose run-of-river powerplant for hydropeaking mitigation*, Hydro2005- Policy into Practice, Villach, Austria, 1-8.
- Heller, P., Bollaert, E., Schleiss, A. J., Pellaud, M., and Schlaepfer, R.** (2006). *Multi-purpose shallow reservoir: Synergies between ecology and energy production*, Proceedings of the Int. Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2006, Lisbon, Portugal, 2027-2035.
- Heller, P.** (2006). *Potentiel d'Assainissement des Cours d'Eau Valaisans, logiciel PACEVs, Outil méthodologique*, Rapport n°18/05 (unpublished), Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ENAC - EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Larousse.** (1994). *Dictionnaire Le Petit Larousse Illustré*, Larousse, Paris, France.
- Leyland, G.** (2002). *Multi-objective optimisation applied to industrial energy problems*, thèse n° 2572, Laboratoire d'énergie industrielle, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Pellaud, M.** (2007). *Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value*, thèse n°3807, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Schleiss, A. J.** (2006). *Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte*, Wasser-Energie-Luft, 98(1), 3-9.

Notation

C_u	Coût unitaire optimal (CHF/unité)
C_{total}	Coût total de l'aménagement (CHF)
H	Niveau d'eau (m)
I_{syn}	Indicateur ou taux de synergie (-)
P	Quantité physique produite (unité)
Q	Débit (m ³ /s)
V	Volume (m ³)

Indices et Exposant

t	temps (h)
res	réservoir
max	capacité
in	entrant
out	sortant
i	objectif de l'aménagement

Remerciements

Ce projet de recherche est financé par la Commission Fédérale pour la Technologie et l'Innovation (Switzerland, projet CTI n° 6794.1 FHS-IW) ainsi que par l'Office Fédéral de l'Environnement (Switzerland, projet Rhône-Thur, module IV, sous-module 4), l'Etat du Valais et les Forces Motrices Valaisanne. Le laboratoire de gestion des écosystèmes (EPFL, Switzerland), le bureau d'ingénieurs STUCKY et le groupe ANDRITZ-VATECH ont apporté leur soutien dans les domaines écologiques et techniques respectivement.

Adresse des auteurs

Dr Philippe Heller
e-dric.ch
Grand-Chemin 73
1066 Epalinges, Suisse
+41-21-784 33 13
<http://e-dric.ch>
philippe.heller@e-dric.ch

Prof. Dr. Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
1015 Lausanne, Suisse
+41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
anton.schleiss@epfl.ch

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Réponse écologique d'un aménagement hydraulique à buts multiples, basée sur la richesse prédite des macro-invertébrés et des valeurs d'habitat de poissons

Marc Pellaud et Rodolphe Schlaepfer

Résumé

L'objectif du module « Ecologie » du projet SYNERGIE est de prédire la réponse écologique consécutive à la conception et à la gestion d'un projet d'aménagement fluvial à buts multiples. Le réservoir, la rivière à poissons et la rivière aval sont les éléments retenus pour l'étude. La qualité écologique de la rivière aval est mesurée à l'aide de la richesse de macro-invertébrés et de la valeur de l'habitat pour les poissons, les deux considérées comme étant dépendantes de variables hydrauliques et morphologiques. Un modèle mathématique a été développé et appliqué à 4 scénarios au Rhône. La meilleure réponse écologique est celle du scénario proposant à la fois une solution pour mitiger l'effet marnage couplé à une diversification morphologique des berges.

Zusammenfassung

Das Modul « Oekologie » des Projektes SYNERGIE erlaubt es den Einfluss der Gestaltung und des Betriebes eines Mehrzwecklaufwasserkraftwerkes auf die ökologischen Auswirkungen vorauszusagen. Der Speicher, das Umgehungsgerinne sowie die Verhältnisse im Unterwasser werden dabei in der ökologischen Modellierung berücksichtigt. Die ökologische Qualität des Gewässers wird mit dem Reichtum der wirbellosen Tiere (Makroinvertebraten) und der Wertigkeit der Fischhabitate gemessen. Diese beiden Indikatoren hängen dabei von den morphologischen und hydraulischen Parameter ab. Ein ökologisches Simulationsmodell wurde entwickelt und an 4 Szenarien in der Rhone angewandt. Die beste oekologische Wirkung kann erzielt werden, wenn die Revitalisierung des Gewässers durch Verbesserung der Gerinnemorphologie gleichzeitig mit einer Abminderung der Schwall- und Sunkerscheinungen dank dem Mehrzwecklaufwasserkraftwerk erfolgt.

1. Introduction

La problématique écologique au sein d'un projet tel que SYNERGIE est de taille. Nos plaines alluviales, nos rivières et nos zones humides ont subi des décennies de perturbations d'origine anthropique (marnage, enrochement des berges, drainage, etc.). Un projet à buts multiples se doit d'intégrer la problématique écologique, et ce, dès la phase conceptuelle. Cette approche présente deux atouts principaux :

(1) elle évite le 'bricolage' écologique souvent observé en post-implémentation de projet (e.g. pose d'une échelle à poissons, élargissement des berges, etc.). Ces mesures sont généralement coûteuses avec des résultats mitigés. La prise en compte dès la phase de conception des considérations écologiques est susceptible d'améliorer l'état actuel.

(2) elle favorise l'acceptation du projet en limitant les oppositions venant des 'écologistes' en les impliquant dans le projet. Cette partie traite donc du développement et de l'implémentation du Volet C dans un module 'Ecologique' intégré dans l'optimiseur général du projet SYNERGIE (Volet B, Chapitre 3). Ce module vise à répondre à la question suivante :

Quelle est la réponse écologique prédite conséquente au design et à la gestion d'un projet tel que SYNERGIE ?

Une description conceptuelle du site d'étude (Riddes – VS) est présentée par Heller (2007). Au niveau du module écologique, les composantes du projet retenues sont :

1. Le réservoir
2. La rivière à poissons
3. La rivière aval

Les deux premières composantes ne font pas directement partie du module, mais leur design est encadré par des considérations écologiques générales visant à maximiser leur intégrité écologique. La composante rivière aval est elle complètement intégrée dans le module écologique et sert de système d'évaluation de la réponse écologique conséquente au projet.

Nos hypothèses de travail sont :

- (1) une richesse prédite élevée traduit une qualité écologique du milieu élevée et
- (2) une note d'habitat élevée traduit une qualité écologique élevée.

Des données provenant de la littérature ont permis le développement de modèles de prédiction de la richesse de certains macro-invertébrés ainsi que des notes d'habitat pour les guildes de poissons. Quatre scénarios comprenant : (1) le Rhône dans son état actuel, (2) le Rhône avec son lit hypothétiquement élargi (amélioration morphologie), (3) le Rhône avec un bassin SYNERGIE optimisé par Heller (2007) (solution marnage) et (4) le Rhône élargi couplé avec un bassin SYNERGIE (amélioration morphologique couplée à une solution marnage).

2. Etat des connaissances

Un état de la connaissance sur les systèmes fluviaux, leur écologie et l'évaluation de leur qualité écologique a permis :

1. L'identification des perturbations d'origine anthropique sur les rivières en général et plus particulièrement sur le Haut Rhône valaisan. De manière générale, l'isolation des rivières de leur plaine alluviale par l'enrochement des berges et la régulation des débits est source de nombreuses perturbations sur les

processus écologiques. Plus particulièrement pour le cas du Rhône, le marnage a été identifié comme une perturbation majeure. Le marnage correspond au phénomène conséquent au turbinage synchronisé des usines hydro-électriques engendrant des hausses quotidiennes de niveau dans le Rhône pouvant atteindre jusqu'à plus d'1m en très peu de temps. L'absence de milieux lentiques dans la plaine du Rhône valaisan a également été observée.

2. La sélection de deux bio-indicateurs pour l'évaluation de la réponse écologique conséquente à des variables de design et de gestion d'un projet tel que SYNERGIE:
 - a) La richesse taxonomique (ici nombre de familles) de trois groupes de macro-invertébrés aquatiques, les Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT).
 - b) Quatre guildes (groupes d'espèces/tailles partageant une écologie similaire) de poissons : (berges – radiers – mouilles – cours plein). Une note de la valeur d'habitat de chaque guildes sert d'indication sur la qualité écologique du milieu (en anglais Habitat Suitability Index HSI).
3. Le rassemblement des données existantes sur le Haut Rhône valaisan.
4. La sélection de techniques de modélisation menant à la prédiction de la réponse écologique et à l'appréciation des effets morphologiques et hydrologiques sur les bio-indicateurs choisis

3. Méthodes

Le module écologique se base uniquement sur trois composantes du système SYNERGIE. Les composantes « *réservoirs* » et « *rivière à poissons* » qui ont pour buts écologiques une amélioration de l'intégrité écologique au niveau local et la limitation de l'effet causé par la centrale et le barrage. La composante « *rivière aval* » intègre la réponse écologique conséquente à un aménagement. Les effets écologiques induits par les deux premières composantes ne rentrent pas directement dans l'évaluation de la réponse écologique, qui sera mesurée sur la rivière aval uniquement.

3.1 *Le réservoir*

La finalité du réservoir à l'échelle de la rivière est de tamponner l'effet marnage en subissant des variations de niveaux induites par la régulation du débit à la sortie de l'aménagement. Le rôle principal du réservoir est donc principalement voué à la partie aval de la rivière mais cela n'est pas forcément antagoniste avec l'amélioration locale de la qualité écologique du milieu. Des structures nommées *ourlets écologiques* (Figure 1) sont mises en place. Lors des hautes eaux, les parties écotonales (situées entre le milieu terrestre et aquatique) sont alimentées en eau. Lorsque le niveau baisse, ces zones sont maintenues en eau et peuvent se réchauffer. L'avantage est double, il permet le développement de ces zones riches et en fort déficit dans la plaine du Rhône et une bonne intégration visuelle par le gommage de l'effet causé par la variation des niveaux dans le réservoir. Ces zones seraient propice au développement de jeunes poissons, batraciens et insectes ainsi qu'au développement des hélophytes associés typiquement à se genre de milieux (e.g. phragmites).



Figure 1. Représentation de l'ourlet écologique sur les berges du réservoir

L'allocation d'une zone sanctuaire d'accès public limité serait également à prévoir, de manière à garantir un lieu de refuge à la faune.

3.2 La rivière à poissons

Le rôle de la rivière à poissons est double. Son premier objectif est le maintien du continuum amont-aval et la mitigation de l'effet barrage, connu pour ses conséquences néfastes sur l'écologie du milieu. Son deuxième objectif est de permettre le développement d'une zone limitée à caractère naturel représentée par une rivière alternant radiers et mouilles et jonchée d'une végétation type. Non seulement toutes les espèces de poissons mais aussi de macro-invertébrés seraient susceptibles de transiter par cet ouvrage, et ce, dans le sens amont-aval ou aval-amont (Figure 2). De plus, une passe à bassins serait disposée à la sortie des turbines de manière à 'récupérer' les salmonidés n'ayant pas suivi le courant d'appel de la rivière à poisson et se retrouvant bloqués devant les turbines.



Figure 2. Rivière à poissons à Ruppoldingen

3.3 La rivière aval

Les 50 kilomètres de rivière situés entre le site de Riddes et l'embouchure du Léman seraient les véritables bénéficiaires d'un tel aménagement. C'est à ce niveau spatial que s'exprime la réponse écologique suivant un tel aménagement. C'est donc sur cette échelle que le module écologique se concentre, d'une part sur la prédiction de la

richesse EPT, et d'autre part, sur l'évaluation de la qualité de l'habitat pour quatre guildes de poissons.

Le premier type de bio-indicateur choisi se base sur des valeurs d'habitat pour quatre guildes de poissons. La détermination des valeurs d'habitat par guildes s'inspirent des travaux de Lamouroux et Souchon (2002). Pour la signification des symboles utilisés, voir sous 6. Notations.

1. La guilde *berge* – regroupant les individus ayant une affinité pour des milieux peu-profonds, avec des vitesses de courant faibles et un substrat relativement fin. La valeur horaire d'habitat pour cette guilde se détermine comme suit :

$$HSI_{Bi} = \left(0.103 - 0.010 * \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q}{g^{0.5} Z^{1.5} W} \right)_i \right) * \left[1 + 4.17 * \exp \left(-23.61 * \frac{Q_i}{10 * W_i} \right) \right] + e_i$$

La valeur annuelle d'habitat étant déterminée comme suit : $HV_B = \int_1^N HSI_{Bi} di$

2. La guilde *radier* – regroupant les individus ayant une affinité pour les milieux peu profonds, avec des vitesses de courant moyennes à élevées et un substrat de taille moyenne. La valeur horaire d'habitat pour cette guilde se détermine comme suit :

$$HSI_{Ri} = \left(1.074 + 0.281 * \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q}{g^{0.5} Z^{1.5} W} \right)_i + 0.3 * \frac{D}{Z} \right) * \left[\left(\frac{Q_i}{10 * W_i} \right)^{0.09} * \exp \left(-15.13 * \frac{10}{Q_i * W_i} \right) \right] + e_i$$

La valeur annuelle d'habitat étant déterminée comme suit : $HV_R = \int_1^N HSI_{Ri} di$

3. La guilde *mouille* – regroupant les individus ayant une affinité pour des milieux profonds, avec des vitesses de courant lentes et un substrat fin. La valeur horaire d'habitat pour cette guilde se détermine comme suit :

$$HSI_{Pi} = \left(0.026 - 0.039 * \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q}{g^{0.5} Z^{1.5} W} \right)_i \right) * \left[1 + 4.17 * \exp \left(-23.61 * \frac{Q_i}{10 * W_i} \right) \right] + e_i$$

La valeur annuelle d'habitat étant déterminée comme suit : $HV_P = \int_1^N HSI_{Pi} di$

4. La guilde *cours plein* – regroupant les individus ayant une affinité pour des milieux profonds, avec des vitesses de courant élevées et un substrat grossier. La valeur horaire d'habitat pour cette guilde se détermine comme suit :

$$HSI_{Mi} = \left(1.352 + 0.713 * \frac{D}{Z} + 0.16 * \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q}{10 * W} \right)_i \right) * \left[\left(\frac{Q_i}{10 * W_i} \right)^{0.32} * \exp \left(-2.87 * \frac{Q_i}{10 * W_i} \right) \right] + e_i$$

La valeur annuelle d'habitat étant déterminée comme suit : $HV_M = \int_1^N HSI_{Mi} di$

L'ensemble des valeurs comprises entre 0 et 1 sont multipliées par la surface en eau de la rivière aval de manière à donner des surfaces pondérées utiles (en ha) pour chacune des guildes.

Le deuxième type de bio-indicateur choisi se base sur des richesses prédites (niveau taxonomique de la famille) des ordres Epheméroptères, Plécoptères et Trichoptères. La méthodologie générale est explicitée à la Figure 3.

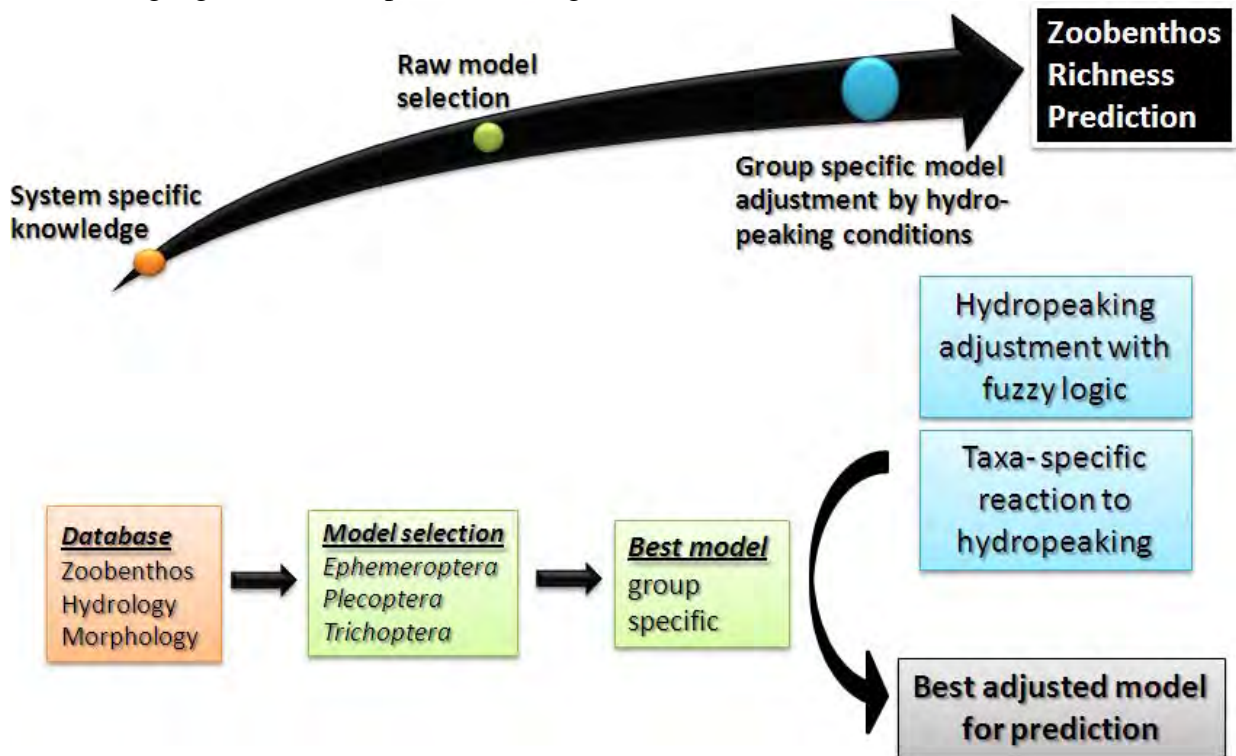


Figure 3. Méthode générale de prédiction de la richesse EPT

Des relevés faunistiques associés à des variables morphologiques et hydrauliques servent de base à l'élaboration de plusieurs modèles paramétriques et non-paramétriques. Une sélection du modèle menant à l'erreur à la prédiction la plus faible est ensuite effectuée. Cette sélection se base sur une validation croisée avec des permutations de Monte Carlo. Le modèle ayant le moins d'erreur à la prédiction est gardé pour chacun des groupes taxonomiques.

Le meilleur modèle non ajusté de prédiction de la richesse pour les Epheméroptères étant :

$$Y_E = 2.16 + 0.43Co + 0.02Gr - 2.96HS + 0.1Z + 0.68S - 0.01KmS$$

Pour les Plécoptères :

$$Y_P = 9.48 - 0.73Bl - 0.38Fi - 1.6HS + 0.47Z - 22.25HL - 0.02KmS$$

Pour les Trichoptères :

$$Y_T = 1.62$$

L'effet marnage est par la suite évalué par un système d'inférence flou prenant en compte l'aspect morphologique dans l'évaluation ainsi que la réponse au marnage spécifique à chaque groupe. Le tout permet d'ajuster les meilleurs modèles de chaque groupe.

Les résultats sont horaires sur une année, leurs moyennes annuelles étant retenues et sommées en un seul indice de prédiction de la richesse EPT.

4. Analyse des différents scénarios

Le module écologique a analysé la réponse écologique sur quatre scénarios dont les détails sont disponibles dans le travail de thèse de Pellaud (2007):

1. Scénario 1 - Le Rhône à Riddes dans sa configuration actuelle, variante sans projet.
2. Scénario 2 – Le Rhône à Riddes avec un élargissement hypothétique de son lit d'environ 40%.
3. Scénario 3 – Le Rhône à Riddes avec un bassin SYNERGIE optimisé par Heller (2007).
4. Scénario 4 – Le Rhône à Riddes avec un élargissement hypothétique de son lit couplé à un bassin SYNERGIE optimisé par Heller (2007).

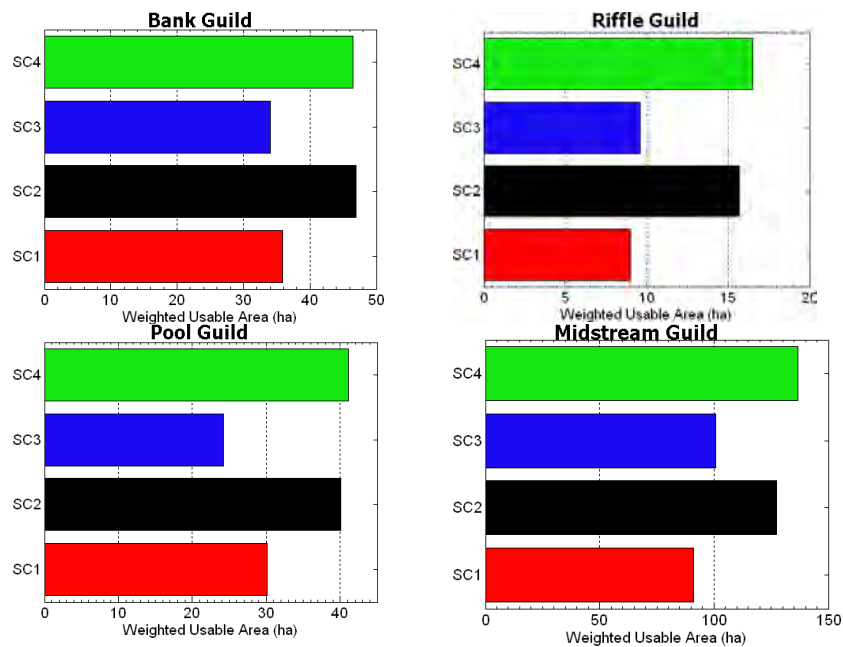


Figure 4. Résultats des surfaces pondérées utiles obtenues (SC_i = Scénario i)

Les poissons semblent véritablement profiter d'un élargissement des berges et être moins sensibles à la mitigation du marnage (Figure 4).

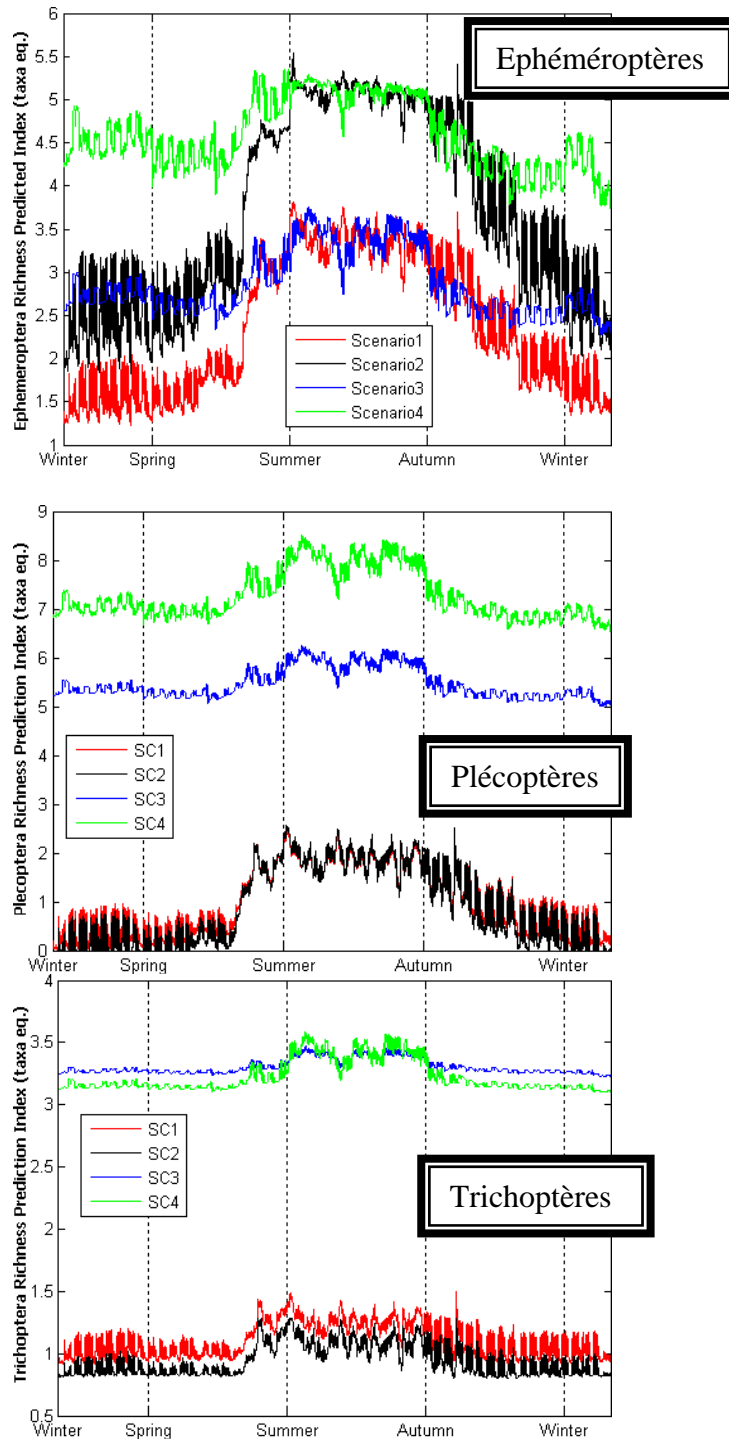


Figure 5. Résultats des prédictions de la richesse EPT ($SC_i = \text{Scénario } i$)

Les macro-invertébrés semblent nettement plus sensibles à l'effet marnage (Figure 5). En effet, un élargissement sans prise en compte de l'effet marnage ne contribue que marginalement à l'amélioration de la qualité écologique du milieu. Il paraît néanmoins que le scénario menant à la meilleure réponse écologique est le scénario 4 – proposant à la fois une solution permettant de mitiger l'effet marnage couplé à une diversification morphologique des berges.

5. Conclusions

Des considérations écologiques générales sont susceptibles d'améliorer l'intégrité écologique à l'échelle de l'ouvrage. En faisant la promotion de milieux disparus, le réservoir diversifie la plaine du Rhône.

Une méthode d'évaluation de la réponse écologique à l'aval de l'ouvrage a été développée mettant en jeux des notes d'habitat de quatre guildes de poissons et des prédictions de richesse de trois groupes taxonomiques de macro-invertébrés aquatiques. Il s'avère que l'utilisation des guildes de poissons comme bio-indicateurs ne paraît pas très pertinente de part le manque de réactivité des notes d'habitat et des nombreuses incertitudes concernant l'effet du marnage sur les guildes de poissons.

De nombreuses perspectives sont offertes par le projet SYNERGIE. Ce projet offre une solution à l'ensemble des producteurs hydro-électriques soucieux de réduire le marnage. D'un point de vue écologique, de plus amples connaissances sur les effets du marnage sur la faune et la flore aquatique sont encore à acquérir avant de prétendre évaluer cet effet de manière précise. Les résultats de ce travail mettent cependant en évidence le besoin de prendre en compte l'aspect morphologique de la rivière dans l'évaluation cet effet marnage. Les modèles développés sur les macro-invertébrés sont partiellement validés mathématiquement mais doivent encore être validés sur le terrain. De plus amples recherches devraient être menées sur le marnage avant de formuler des recommandations légales sur les tolérances allouées au marnage dans nos rivières.

Notations

L'ensemble des variables utilisées sont détaillées dans Pellaud (2007).

N: nombre d'heures (1 année \rightarrow 8760)

Q: débit (m^3/s)

$g=9.81 m/s^{-2}$

Z: profondeur (m)

W : largeur lit mouillé (m)

e: erreur aléatoire

D : granulométrie médiane (m)

Co: % galets (20-200 mm)

Bl: % block (>200 mm)

Gr: % graviers (2-20 mm)

Fi : % fines (<0.02 mm)

HS : intégrateur marnage courte durée (m)

HL : intégrateur marnage annuel (m)

S : vitesse du courant (m/s)

KmS : distance à la source (Km)

Bibliographie

- Lamouroux, N. et Y. Souchon (2002). Simple predictions of in stream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. *Freshwater Biology* **47**(6): 1531-1542.
- Heller, P. (2007). Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples par une analyse systémique, thèse n°3781, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Pellaud, M. (2007). "Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value," thèse n°3807, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Remerciements

Ce projet de recherche est financé par la Commission Fédérale pour la Technologie et l'Innovation (Switzerland, projet CTI n° 6794.1 FHS-IW) ainsi que par l'Office Fédéral de l'Environnement (Switzerland, projet Rhône-Thur, module IV, sous-module 4), l'Etat du Valais et les Forces Motrices Valaisanne. Le laboratoire de gestion des écosystèmes (EPFL, Switzerland), le bureau d'ingénieurs STUCKY et le groupe ANDRITZ-VATECH ont apporté leur soutien dans les domaines écologiques et techniques respectivement.

Adresses des auteurs

Prof. Dr. Rodolphe Schlaepfer
EPFL ENAC ISTE-GE
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18
1015 Lausanne
+41-21-693 57 71
rodolphe.schlaepfer@epfl.ch

Marc Pellaud
Lombard Odier Darier Hentsch & Cie – Banquiers Privés
Quantitative Asset Management & Research
Rue de la Corraterie 11
1204 Genève
+41 22 709 90 20
marc.pellaud@lodh.com

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Objectifs paysagers d'un aménagement hydraulique à buts multiples

Thierry De Pourtalès

1. Rappel de définitions

1.1 Paysage

« une partie d'un territoire que la nature présente à l'œil qui le regarde » (Petit Robert 1, Paris 1990)

« une partie du territoire telle que perçue par les populations, **dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations** » (Conseil de l'Europe : La convention européenne du paysage. Florence, 20.10.2000)

1.2 Territoire

« L'étendue de la surface terrestre sur laquelle vit un groupe humain, et plus spécialement une collectivité politique nationale. Cela désigne aussi l'étendue de pays sur laquelle s'exerce une autorité, une juridiction. » (Petit Robert 1, Paris 1990).



Figure 1 : Coudes de Riddes (urbanisation, axes principaux et accès au site)

2. Introduction

Durant ces trois années de recherche et d'analyse de la problématique liée à l'intégration paysagère de retenue et de centrale hydroélectrique au niveau territorial, il s'est confirmé qu'un des éléments essentiels de cette intégration est la compréhension du lieu, d'un point de vue géographique, topographique, historique, et socio-économique et ce à différentes échelles.

Trois niveaux ou échelles d'interventions principales sont à prendre en compte pour permettre l'intégration d'un aménagement à buts multiples dans un paysage donné :

- l'intégration à l'échelle du grand paysage : **la vallée**
- l'intégration à l'échelle du secteur d'intervention : **une ou deux communes**
- l'intégration des installations et des contraintes techniques dans le site : **la retenue**

Beaucoup d'autres éléments doivent, également, être pris en compte et intégrés au processus du choix du site dès les premières études. En effet, les accès routiers et les parkings, les cheminements pédestres, cyclables ou équestres, les zones de loisirs et sportives (aquatiques et terrestres) ou éventuellement même les quelques installations techniques impératives à l'utilisation du site, tels que vestiaires, toilettes, restaurants, commerces, font partie du projet à intégrer, au même titre que les installations techniques hydrauliques du projet.

Il est dès lors impératif de recenser les éléments préexistants dans les sites potentiels, cela afin d'intégrer dès le début du processus un maximum de contraintes liées à l'intégration du projet aux différentes échelles territoriales.

2.1 L'intégration à l'échelle du grand paysage : la vallée

Une étude préalable de la géographie générale de la vallée est nécessaire. Il est en effet indispensable d'en connaître l'évolution historique au niveau de l'hydrologie, de la topographie, de l'agriculture, des vergers, des forêts et de l'urbanisation durant les deux derniers siècles.

L'étude de la vallée actuelle permet de comprendre à l'échelle territoriale, les compartimentages de terrain, les milieux urbains et les secteurs agricoles et forestiers, les voies principales de circulation routière et ferroviaire, les cours d'eau naturels et canalisés, les surfaces d'eau existantes, ainsi que tous les éléments topographiques naturels ou artificiels présents. Cette recherche permet de faire un choix de secteurs qui permettraient d'intégrer de façon paysagère la plus optimale une retenue importante d'eau dans la vallée d'une part mais aussi, d'autre part, un programme s'y rattachant qui s'intègre et qui contribue au développement général de la vallée.

2.2 L'intégration à l'échelle du secteur d'intervention : une ou deux communes

L'étude du paysage à grande échelle a permis de déterminer des secteurs envisageables pouvant accueillir une retenue. A partir de ces sites sélectionnés, les calculs hydrauliques imposent un secteur général pour l'implantation du barrage, la hauteur des digues et la surface de la retenue. Il s'agit alors d'intégrer dans le paysage, le barrage en rivière avec la centrale hydroélectrique, les digues et la retenue. Il faut, dès lors, analyser précisément la topographie du lieu, les éléments de digues existants ou préexistants sous d'autres formes (routes, autoroute, voies de chemin de fer, collines etc.) et rechercher une solution paysagère pour les intégrer ou les relier harmonieusement avec les nouvelles digues construites.

A priori, il n'est pas possible d'énumérer des conditions limites pour la construction de ces digues, ni en hauteur, ni dans leur aspect (rectiligne ou non, matériaux, couverture, etc.). Le travail d'intégration doit se faire pour chaque tronçon et ce sont les conditions environnantes qui dictent les conditions architecturales et paysagères.

On peut néanmoins énoncer les trois principes suivants :

- en général, minimiser la création des digues artificielles
- maximiser les digues à fonctions multiples (diversité d'utilités architecturales et paysagères)
- minimiser la création de digues à fonction unique

En parallèle de cette étude, il s'agit de relever et recenser précisément les infrastructures existantes dans le site (accessibilités piétonnes et cyclables, routes et parkings par exemples) les périmètres urbanisés ou à développer, les types de cultures sur les terres agricoles et les secteurs à protéger impérativement et ceux, à peut-être laisser en zones inondables.

Un recensement et une analyse des besoins des communes avoisinantes (touristiques, sportifs, loisirs, environnementaux, écologiques...) et des potentiels du secteur

d'intervention permettent de tracer les lignes directrices d'un programme lié à la retenue hydraulique.

2.3 L'intégration des installations et des contraintes techniques dans le site : la retenue

Le choix programmatique et de type d'utilisation et d'utilisateurs du secteur de la retenue influence la réflexion sur la manière d'intégrer les différents éléments constituant la retenue.

Les éléments principaux sont le barrage, les digues, la surface d'eau et le marnage lié à l'installation hydroélectrique et les surfaces annexes liées soit à l'ouvrage hydroélectrique soit au programme " publique " venant se greffer sur cette retenue.

Le barrage est un élément ponctuel. Ses dimensions et son caractère " construit " nécessitent de le traiter avec beaucoup de soin.

La dimension la plus imposante pour un barrage est sa hauteur. Un tel ouvrage crée en effet une coupure visuelle importante dans l'élément particulièrement longiligne qu'est une rivière.

L'emplacement du barrage, indépendamment des considérations techniques, peut être déterminant pour l'intégration de l'ouvrage dans le paysage. Deux options sont à prendre en compte dès la conception du projet. On peut soit chercher à fondre le barrage dans le paysage, soit au contraire chercher à le mettre en évidence. Ce choix d'intégration dans le site ne peut se faire qu'après une étude générale du secteur et une connaissance d'une part du concept général qui guidera la future utilisation du site et d'autre part des paramètres techniques du barrage, tel que par exemple, son accessibilité, la présence de superstructures techniques ou non, et sa hauteur totale, à mesurer depuis le plan d'eau aval jusqu'au sommet de la construction.

La seconde dimension importante d'un barrage est sa largeur, plus précisément sa longueur de couronnement. Bien que cette dernière soit strictement liée à la largeur de la rivière, relativement constante pour un tronçon donné, on peut toutefois admettre un barrage en plusieurs parties, pour autant que ces dernières soient reliées entre elles. Le nouveau paramètre n'est ainsi plus la longueur de couronnement du barrage mais la longueur de couronnement de chacune de ses deux parties. Cette division peut être créée, par exemple, par la construction d'une île entre l'évacuateur des crues et la centrale.

La retenue, qui intègre le plan d'eau en lui-même ainsi que les aménagements relatifs à celui-ci, notamment les digues rendues nécessaires par la surélévation du plan d'eau amont, est en surface l'élément le plus important et peut prendre également en coupe une réalité très imposante. En effet, il faut surélever les digues existantes et construire les digues manquantes de sorte à ce que la surface inondée ne dépasse pas le potentiel submersible.

Les mêmes éléments paysagers sont à prendre en compte que ceux qui sont évoqués dans la problématique de l'intégration du barrage ou des arrières digues, cependant, dans le cas des digues principales, leur présence est très souvent plus imposante de par leur hauteur et leur fonction très visible de digue, l'eau étant retenue en permanence sur un des côtés.

Il est dès lors indispensable d'étudier la coupe de ces digues qui d'une part doit répondre à un plan d'eau qui varie quotidiennement en hauteur au gré du marnage, ce

qui selon le type de coupe laisse visible une bande de boue grisâtre et humide de plusieurs mètres et d'autre part répondre de son côté sec à un paysage préexistant qui doit s'accommoder d'une importante rupture topographique et d'un nouveau compartimentage géographique.

Les aménagements annexes, d'un point de vue paysager, doivent s'intégrer dans le site et permettre par leur utilisation la mise en valeur de la retenue. Que ce soit des bâtiments (vestiaires, restaurants, halles de sports, toilettes, commerces, bâtiments techniques pour la centrale électrique, etc.) ou des aménagements de circulation (parking, route d'accès, arrêt de bus), des chemins pédestres, pistes cyclables et cheminements équestres ou des biotopes créés artificiellement, il faut dans tous les cas que ces derniers soient judicieusement intégrés dans le site. Une étude particulière est ainsi nécessaire pour chacun d'eux, afin d'une part permettre au site de se développer grâce aux nouvelles caractéristiques qu'il offre et d'autre part rendre possible l'intégration de ce secteur réaménagé, dans le contexte paysager et urbanistique général.

Afin de permettre une intégration paysagère optimale, il est important de se rendre compte que tous ces éléments contribuent à cette intégration et de noter qu'aussi bien pour le barrage que pour les digues et même les installations annexes, une préférence doit être donnée pour des ouvrages à fonctions et utilisations multiples. Ainsi le mur latéral du barrage peut aussi avoir la fonction de mur de soutien pour un ouvrage secondaire, le couronnement peut devenir également un pont sur la rivière, les digues des promenades pédestres ou cyclables, le plan d'eau un espace de sports et loisirs et/ou même développer des secteurs protégés pour favoriser la création de biotopes, les côtés "sec" des digues des surfaces boisées, ou des prairies maigres s'offrant aux loisirs des habitants des urbanisations proches, etc



Figure 2 : Lac aménagé en espace de détente



Figure 3 : Le Rhône endigué à l'amont de Martigny



Figure 4 : Canal retouché pour offrir un contact à l'eau



Figure 5 : La Lizerne canalisée

3. Méthodologie

Un travail sur une méthodologie d'analyse territoriale a été fait durant cette recherche afin d'obtenir des bases de données similaires pour différentes études sur différents sites.

Cette méthodologie devrait pouvoir permettre des analyses de base complète pour des avants-projets sur différents types de sites.

Il est évident que c'est un modèle qui peut et doit s'adapter aux situations particulières. Il permet, dans un premier temps, de cataloguer les éléments principaux formateurs d'un lieu, puis cette première appréhension du site doit permettre de développer et approfondir les caractères particuliers qui définissent la portion de territoire analysée.

L'analyse se déroule en trois phases. Un aller-retour entre les phases permet de comprendre et développer l'analyse selon les caractéristiques du lieu et également du projet.

3.1 PHASE I Analyse du grand site et définition du périmètre

Cette étape consiste à élaborer :

- l'analyse prospective et le diagnostic du grand site du Nord au Sud et d'Est en Ouest : Dans ce cas, le long du Rhône valaisan
- l'analyse d'un ou de plusieurs secteurs définis par l'analyse du grand site et une spéculation d'implantation programmatique.

3.2 *PHASE II Elaboration du programme et premières intentions de projet*

Lors de cette étape de transition entre l'analyse et l'avant-projet, il doit en ressortir :

- un programme cohérent avec le secteur choisi et le caractère du territoire en fonction des grandes lignes fixées par l'analyse
- un parti d'implantation et les premières esquisses avec la proposition d'un concept à développer sur la base du programme qui découle de l'analyse

3.3 *Phase III Développement du projet d'aménagement*

En fonction des éléments retenus lors de l'étape précédente, il est possible de développer par exemple :

- Le projet d'intégration du barrage et de la centrale
- le projet du parking du site technique et du site renaturisé, touristique, sportif ou du réseau ludique
- le projet des nouvelles berges
- le projet des chemins (piétons, vélos, cheval...) situés le long de la rivière
- le projet détaillé d'une portion de chemin
- ...

4. Les utilisations possibles des berges du Rhône



Figure 7: Piste cyclable sur la digue



Figure 6: Piste de galop inondable, le long du Rhône



Figure 8: Promenade + piste équestre sur les berges du Rhône



Figure 9: Sentier pédestre au pied de la digue

5. Analyse terrain

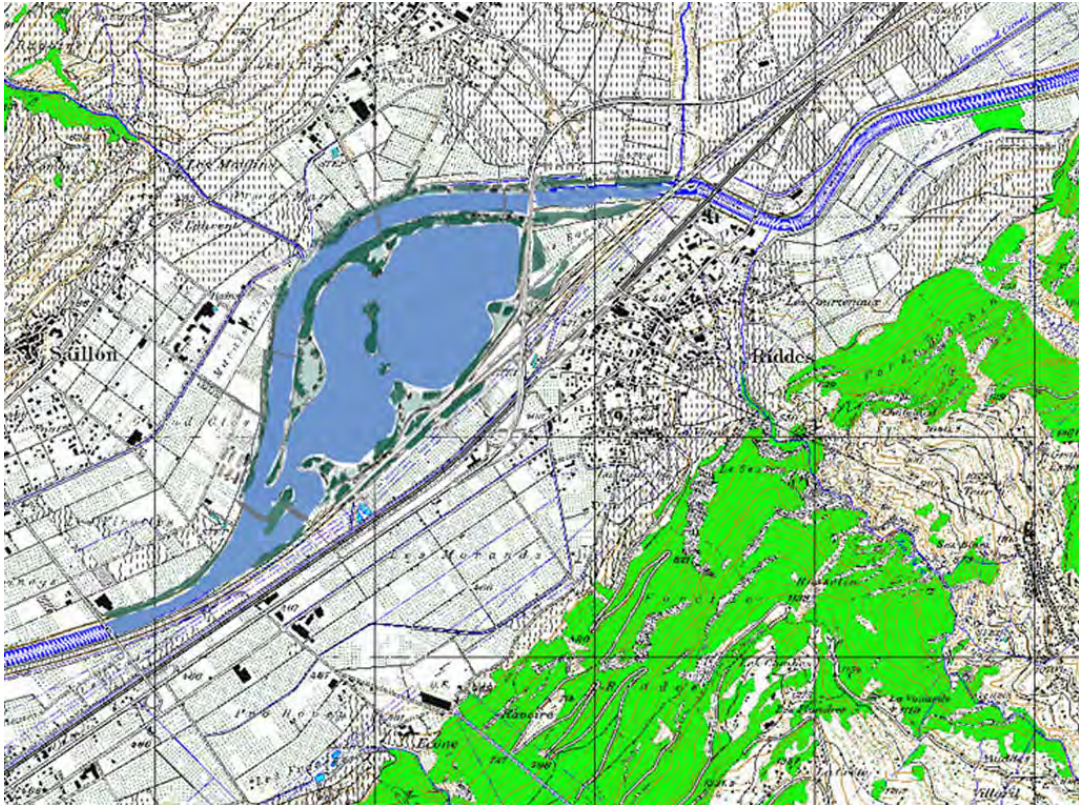


Figure 10: première étude carte de l'intégration de la retenue dans le site



Figure 11: vue panoramique et intégration de la retenue dans la plaine

5.1 Analyse du paysage dans le secteur d'intervention

- **Analyse du paysage préexistant** (Grand paysage – secteur d'intervention)
 - Paysage historique
 - Paysage actuel
 - Paysage futur

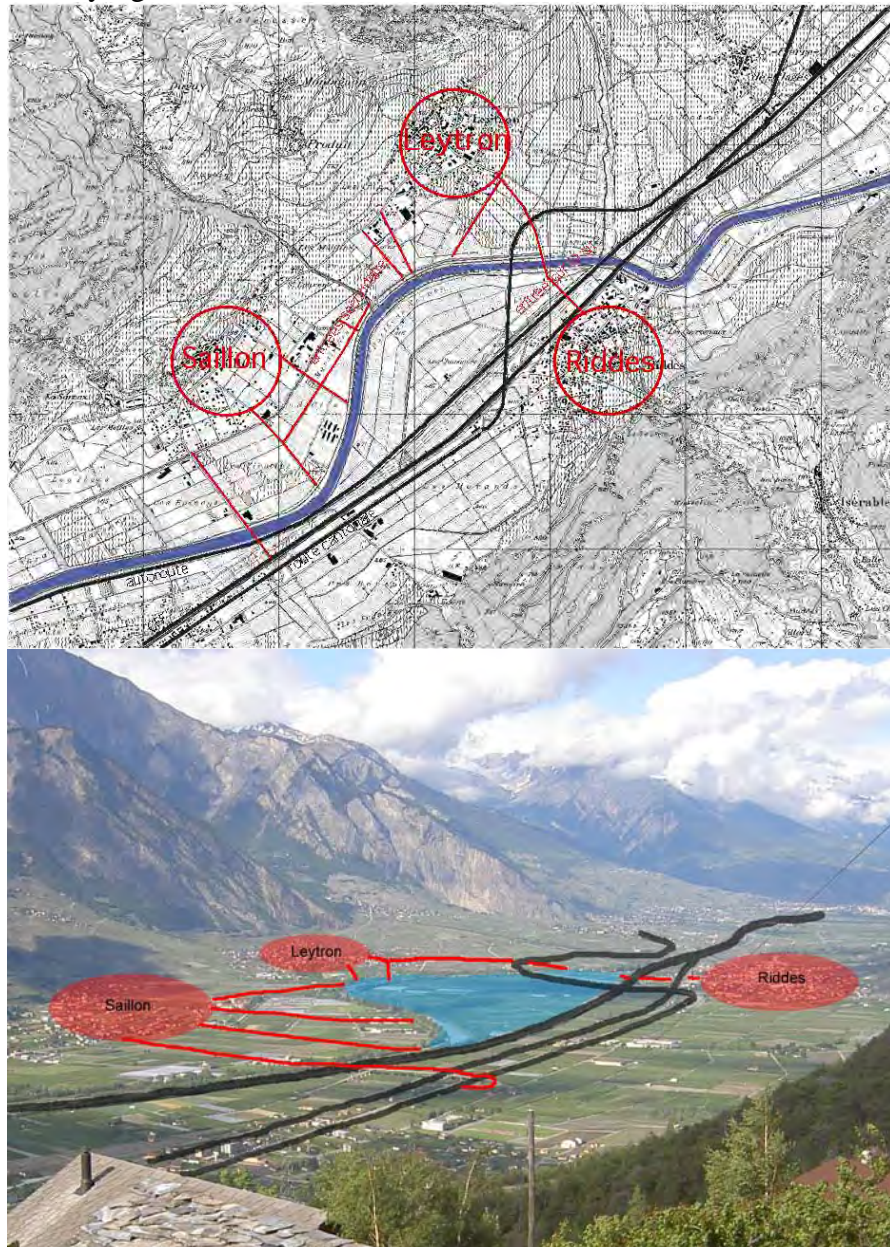


Figure 12: Riddes, urbanisation et principaux axes et accès au site

- **Analyse des possibilités paysagères** (Grand paysage – secteur d'intervention)
 - Géographiques
 - Topographiques

- Ecologiques
- Techniques
- Programmatiques
- ...

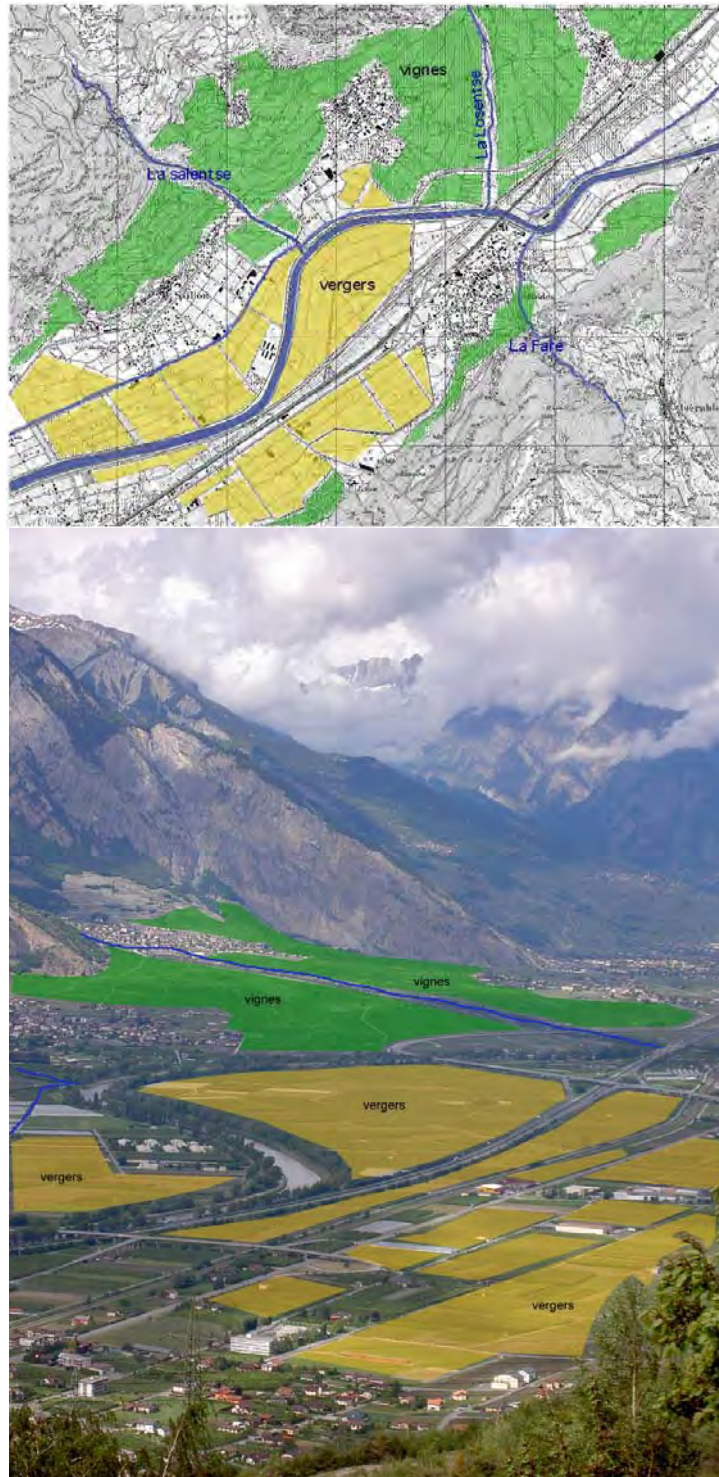


Figure 13: Riddes, surface, plantation et agriculture

- **Analyse des attentes générales** (Grand paysage – secteur d'intervention)
 - Programmatiques
 - Ecologiques
 - Techniques
 - Economiques

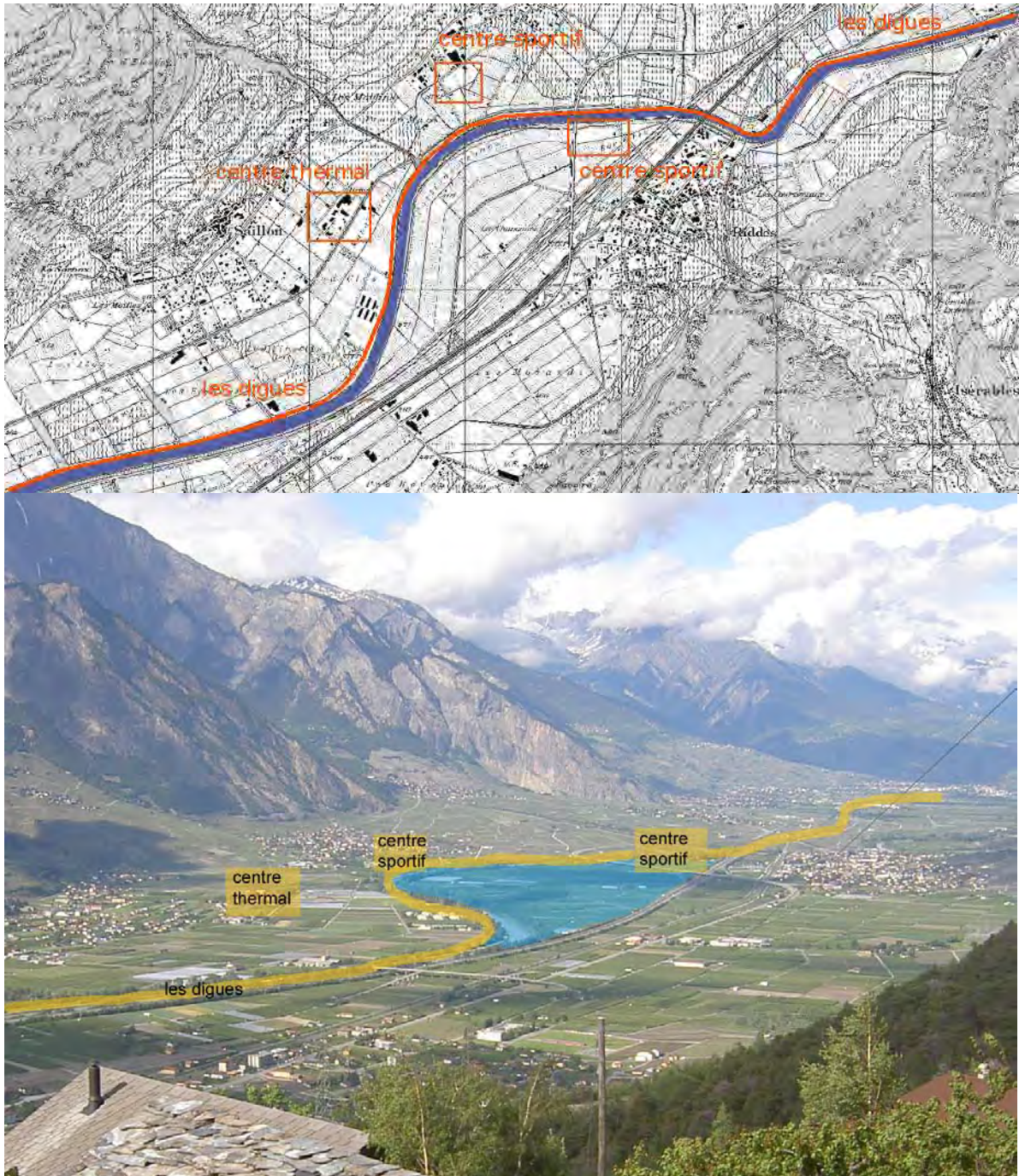


Figure 14: Riddes et environs, infrastructures principales

5.2 Contraintes

- **Techniques**
 - Hauteur exploitation [m] 8.68
 - Surface [km²] 1
 - **Lac niveau min hiver [m] -4.5**
 - **Lac niveau min été [m] -0.8**
 - Débit équipé [m³/s] 200
 - Débit passe à poisson [m³/s] 5
 - **Température moyenne en été 18°C**
- Economiques
- Politiques
- Géographiques
- Topographiques
- **Ecologiques** (types d'espèces, type de végétations dans quel secteur et avec quel rapport à l'eau, ...)
- Programmatiques (le programme entraîne un type d'aménagement spécifique...)



Figure 15: marnage de la retenue, contraintes sur les berges



Figure 16: rivière à poissons construite de façon « naturelle »

5.3 Attentes

(type de programme recherché / type de paysage recherché)

- **Hydrauliques**
- **Ecologiques**
 - zones accessibles
 - zones protégées
 - zones inondables et/ou semi-inondables
- **Programmatiques / Touristiques**
 - Centre nautique
 - Centre sportif
 - Promenades thématiques
 - Espaces de détente et loisirs
 - Cheminements piétonniers
 - Cheminements équestres
 - Pistes cyclables
 - ...

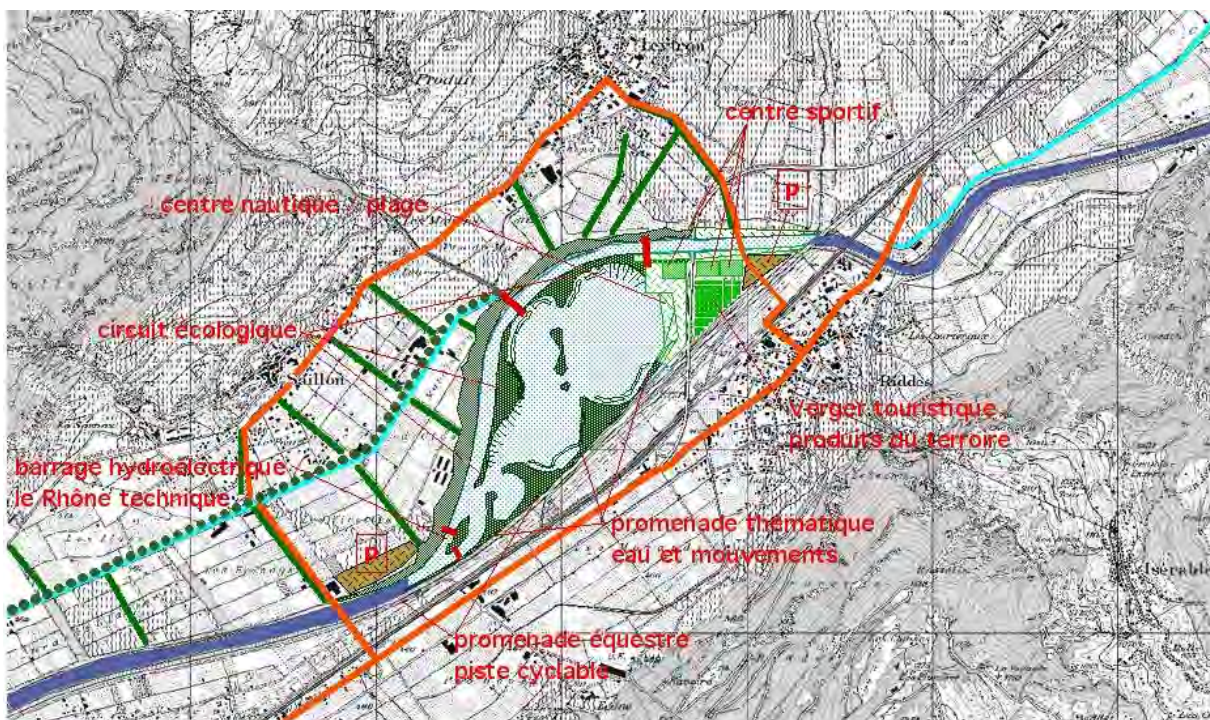


Figure 17: Riddes, programme thématique et avant-projet

Remerciements

Ce projet de recherche est financé par la Commission Fédérale pour la Technologie et l'Innovation (Switzerland, projet CTI n° 6794.1 FHS-IW) ainsi que par l'Office Fédéral de l'Environnement (Switzerland, projet Rhône-Thur, module IV, sous-module 4), l'Etat du Valais et les Forces Motrices Valaisanne. Le laboratoire de gestion des écosystèmes (EPFL, Switzerland), le bureau d'ingénieurs STUCKY et le groupe ANDRITZ-VATECH ont apporté leur soutien dans les domaines écologiques et techniques respectivement.

Adresse de l'auteur

Thierry De Pourtalès
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
 Station 18, 1015 Lausanne
 +41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
thierry.depourtales@bluewin.ch

Mesures d'aménagements des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie

Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft

Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz - Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement »

Anton Schleiss und Armin Peter

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement ist unter dem Leitmotiv „Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz“ auf zwei Themen fokussiert. Einerseits wird die Wechselwirkung zwischen konstruktiven Hochwasserschutzmassnahmen und der Lebensraumvielfalt in Fliessgewässern untersucht. Andererseits werden die Auswirkungen der Längs- und Quervernetzung der Fliessgewässer auf deren Durchgängigkeit und den Genfluss betrachtet. Zusätzlich werden die Dimensionierungswerkzeuge zur Lösung der entsprechenden flussbaulichen Fragestellungen erarbeitet.

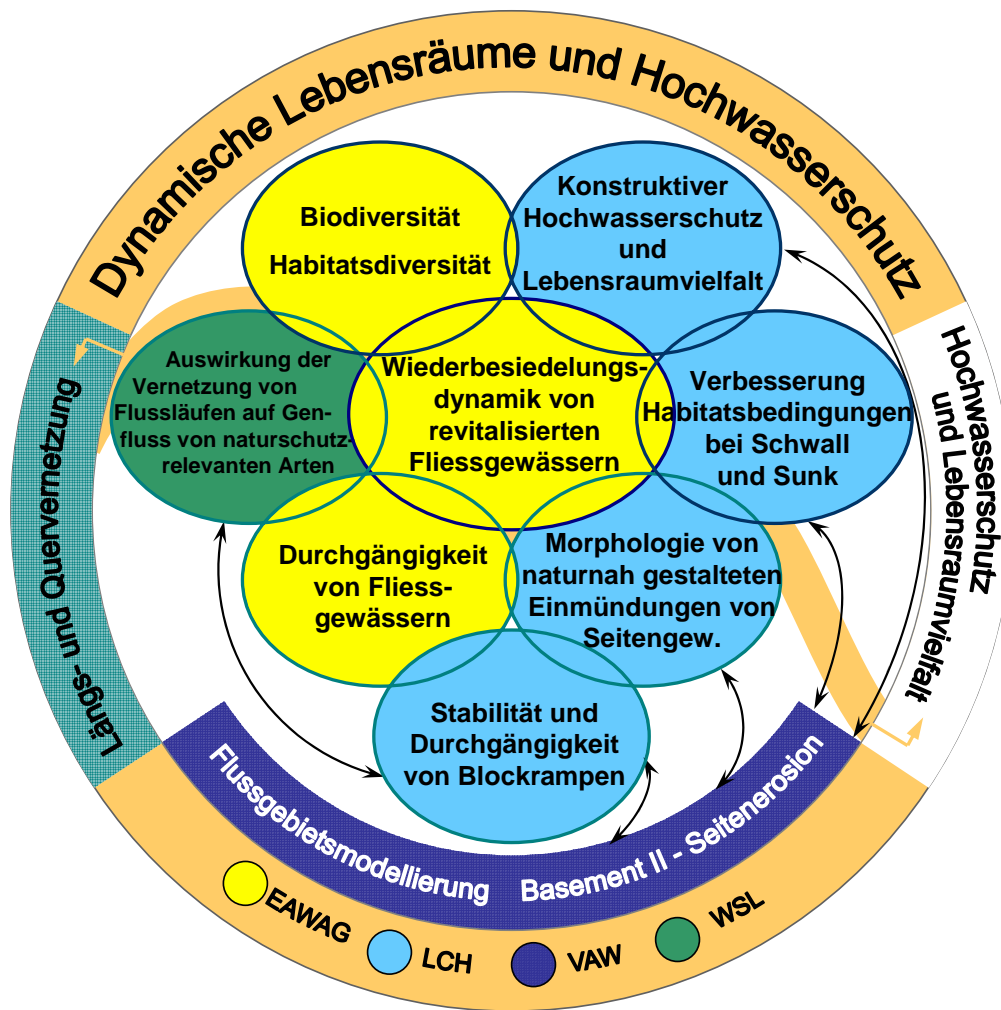
Résumé : Habitats dynamiques et protection contre les crues – projet de recherche « Gestion intégrale des réseaux fluviaux »

Le projet « Gestion intégrale des réseaux fluviaux » avec la ligne générale « Habitats dynamiques et protection contre les crues » est focalisée sur deux thèmes. D'une part, l'interaction entre des mesures constructives de protection et la richesse des habitats est étudiée. De l'autre côté, l'effet de la connectivité longitudinale et latérale sur la migration des espèces et le flux de gènes est traité. En plus des outils de dimensionnement pour répondre aux questions des projets d'aménagement de cours d'eau sont élaborés.

1. Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz als Schwerpunkt des Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement »

Gemäss der neuen Wegleitung 2001 „Hochwasserschutz an Fliessgewässern“ wird empfohlen, dass neben den Hochwasserschutzdefiziten auch die ökologischen Defizite eines Gewässers zu berücksichtigen sind. Dieser systematische Ansatz, soll die Gleichbehandlung aller Ansprüche des Gewässers garantieren und so eine einseitige Sichtweise verhindert.

Naturnahe Gewässer bieten dynamische, d.h. sich ständig verändernde Lebensräume. Gewässerdynamik und Flusskorrekturen stehen grundsätzlich in einem Widerspruch.



Figur 1: Vernetzung der Themen und Teilprojekte des Forschungsprojektes « Integrales Flussgebietsmanagement »

Bei nach der geltenden Hochwasserschutzphilosophie realisierten baulichen Massnahmen muss aber trotzdem versucht werden, den Anspruch von dynamischen Lebensräumen zu erfüllen. Dies ist nur mit innovativen Konzepten und der Nutzung möglicher Synergien möglich.

Flussbaulichen Massnahmen müssen grundsätzlich so gestaltet werden, dass eine möglichst grosse Strömungsvielfalt entsteht. Der Wasserbauer sollte sich nicht davor scheuen die Strömung mit den Schutzmassnahmen zu stören, obwohl dadurch seine hydraulischen Berechnungen gestört, beziehungsweise komplizierter werden. Selbst ein unvermeidbarer Blockwurf in einem nahezu geraden Gewässerabschnitt sollte geschlängelt ausgebildet werden, da dadurch die Strömungsvielfalt erheblich erhöht wird. Mit einer entsprechenden Gestaltung der konstruktiven Hochwasserschutzmassnahmen ist insbesondere ein möglichst grosser Strukturreichtum im Fließgewässer anzustreben, da dieser sich unbestritten positiv auf die Artenvielfalt in und an einem Gewässer auswirkt. Strukturreichtum ist immer das Resultat von einer minimalen Gewässerdynamik indem beispielsweise regelmässig Geschiebe im Gerinne umgelagert wird und lokale Ufererosionen entstehen.

Eine natürliche grossräumige Gewässerdynamik benötigt viel Raum, welcher in stark besiedelten Gebieten nur noch teilweise vorhanden oder verfügbar ist. Man muss sich deshalb zwangsläufig mit einer eingeschränkten Gewässerdynamik begnügen. Diese sollte aber wenn immer möglich in den verfügbaren Grenzen ausgenutzt werden. Auch eine kleinräumige Gewässerdynamik ist ökologisch schon ein grosser Gewinn, da der Strukturreichtum im Fliessgewässer und somit die verfügbaren Lebensräume sehr stark erhöht werden. Damit die Gewässerdynamik bei Hochwasser in besiedelten Gebieten nicht unkontrollierbar sind konstruktiven Hochwasserschutzmassnahmen unabdingbar. Diese sollten aber die Dynamik nur so weit als nötig einschränken und die Strukturvielfalt so gross wie möglich halten.

Das Forschungsprojekt « Integrales Flussgebietsmanagement » möchte diese Bestreben mit wissenschaftlichen Grundlagen unterstützen und mit praktischen Empfehlungen in der Form einer umfassenden Synthese erleichtern.

Unter dem Leitmotiv „Dynamische Lebensräume und Hochwasserschutz“ haben die Projektpartner in enger Zusammenarbeit verschiedene Teilprojekte definiert, welche auf zwei Themen fokussiert sind (Figur 1):

- Wechselwirkung zwischen konstruktiven Hochwasserschutzmassnahmen und der Lebensraumvielfalt in Fliessgewässern (4 Teilprojekte)
- Längs- und Quervernetzung der Fliessgewässer (4 Teilprojekte)

Diese Themen erlauben eine enge Verknüpfung zwischen ingenieurmässiger und naturwissenschaftlicher Forschung. Dadurch können die best möglichen Synergien zwischen konstruktivem Hochwasserschutz und Gewässerökologie erzielt werden. Die Verknüpfung der einzelnen Teilprojekte ist aus Figur 1 ersichtlich.

Der Fokus « Wechselwirkung zwischen konstruktiven Hochwasserschutzmassnahmen und der Lebensraumvielfalt » beinhaltet die Interaktion zwischen konstruktiven aber naturnahen Hochwasserschutzmassnahmen mit der Bio- und Habitatsdiversität. Untersucht wird auch wie die Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk verbessert werden können. Diese Teilprojekte sind miteinander über die Fragestellung der Wiederbesiedlungsdynamik von revitalisierten Fliessgewässern verknüpft. Dadurch ergibt sich eine Verknüpfung mit dem zweiten Fokus « Längs- und Quervernetzung », welcher die Durchgängigkeit von Fliessgewässern beinhaltet. Spezielles Augenmerk wird dabei auf die Blockrampen sowie die Einmündungen von Seitengewässern gerichtet. Das Teilprojekt « Flussgebietsmodellierung » liefert die Dimensionierungswerkzeuge zur Lösung der entsprechenden flussbaulichen Fragestellungen.

Alle diese Teilprojekte können auch dazu beitragen, Synergien im Rahmen der 3. Rhonekorrektur und anderen Hochwasserschutzvorhaben nachhaltig auszunutzen, indem die wissenschaftlichen Erkenntnisse mit konkreten Anwendungsbeispielen und Pilotstudien der wasserbaulichen Praxis zugänglich gemacht werden.

Die Laufzeit der Projekte beträgt 3 Jahre (November 2007-Oktober 2010) plus ein Jahr für die Erstellung der Synthesearbeiten für die Praxis (Fertigstellung bis Ende 2011).

Die verschiedenen Forschungsprojekte werden im Folgenden für jeden Projektpartner kurz beschrieben.

2. Forschungsprojekte der Eawag

2.1 *Habitatsdiversität und Biodiversität*

Die Habitatsdiversität eines Flusses bestimmt neben dem Abflussregime und der Gewässerchemie weitgehend die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft. Zusätzlich sind regionale und lokale Muster der Besiedlung zu berücksichtigen. Unter Habitatsdiversität werden im Folgenden hauptsächlich die flussmorphologischen Eigenschaften und flussdynamischen Prozesse verstanden. Wichtige Faktoren sind: Linienführung, Gewässerbreite, Tiefe, Fließgeschwindigkeit, Geschiebe, Substratzusammensetzung, Strukturen im Gewässer, Uferbereich.

In monotonen Gewässern ist die Habitatsvielfalt gering (monotone Querprofile). Bisher wurde die Habitatsvielfalt meist mit einem Habitatsqualitätsindex (HQI) beschrieben. Dabei können unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden, meist sind es jedoch Faktoren wie Tiefe, Breite, Substrat sowie Strukturen (z. B. Fischunterstände). In Bezug auf die Fische werden oft Fischbiomassen in Funktion der Habitatstrukturen (Unterstände) beschrieben (Bjornn und Reiser 1991). Die bisher verwendeten Ansätze berücksichtigen jedoch das Problem der Feinsedimente und Flusskolmation sowie die hydraulischen Bedingungen nicht. Meist werden sehr oft einfache Beziehungen zwischen Fischdiversität (oder Diversität der Wirbellosen) und Habitatsdiversität postuliert, die in unseren Gewässern bisher nur teilweise bestätigt werden konnten (z. B. Fischdiversität in Funktion der Flussbreitenvariabilität oder Maximaltiefe).

Gefragt sind neue Ansätze zur Charakterisierung der Habitatsdiversität, die für die Beschreibung des Habitatsqualitätsindex eine umfassende Anzahl von Metrics berücksichtigen. Diese Ansätze sollen für einige Schlüsselarten des Makrozoobenthos sowie Lebewesen der Uferlinie, aber auch für verschiedene Gilden von Fischen entwickelt werden. Basierend auf der Variabilität von Lebensgemeinschaften in Referenzsituationen und den dazugehörigen morphologischen und hydraulischen Parametern sollen diejenigen Metrics identifiziert werden, welche die Lebensgemeinschaften hinreichend bestimmen (Tejerina-Garro et al., 2006). In anthropogen veränderten Fließgewässern sollen die Abweichungen dieser Metrics zusammen mit den veränderten Lebensgemeinschaften identifiziert werden. Neben Meereshöhe und Temperatur bestimmen vor allem morphologische und hydraulische Parameter die Biomasse in Gewässeroberläufen. Diese wichtigsten Parameter sind: Unterstände für Fische, mittlere Fließgeschwindigkeiten am Flussbett, mittlere Tiefe und Tiefen/Breite Verhältnis (Baran et al., 1993).

Für die Entwicklung eines neuen Habitatsdiversitätsansatzes (z. B. hydraulisch-morphologischer Vielfältigkeitsindex, Schleiss 2005) braucht es eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Wasserbauern und Flussökologen.

Hohe Abflüsse und Geschiebetrieb verändern die Parameter eines Flussbettes stetig, die Werte bleiben jedoch innerhalb bestimmter Grenzen ähnlich. Diese Dynamik ist zu berücksichtigen. Aus diesem Ansatz soll ein hydraulisch-morphologischer Index (HMI) entwickelt werden.

Für die durchgeführten Arbeiten werden folgende Resultate erwartet:

- Identifikation der wichtigsten abiotischen Parameter zur Beschreibung der morphologischen und hydraulischen Variabilität

- Gewichtung der einzelnen Parameter bezüglich unterschiedlicher Gilden (Makrozoobenthos und Fische)
- Charakterisierung der Fliessgewässertypen anhand morphologischer und hydraulischer Eigenschaften, verbunden mit der Formulierung eines Index (HMI)
- Beziehungen zwischen HMI und biologischen Eigenschaften (Diversität der Fische, Diversität des Makrozoobenthos, Biomassen)
- Massnahmenbezogene Auswertung des Index. Mit welchen flussbaulichen Massnahmen und Revitalisierungsvorgehen lassen sich vielfältige Habitate wiederherstellen.
- Einbezug der flussdynamischen Prozesse

2.2 Durchgängigkeit von Fliessgewässern

Die schweizerischen Fliessgewässer sind weitgehend verbaut und durch künstliche Querbauwerke stark fragmentiert. Ökomorphologische Erhebungen aus verschiedenen Kantonen belegen die deutliche Fragmentierung der Gewässer. Im Kanton Zürich (www.gewaesserschutz.zh.ch) existieren pro Fliesskilometer rund 11 künstliche Querbauwerke, im Kanton Aargau sind es deren fünf und im Kanton Bern zwei (www.gsa.bve.be.ch). Notter et al. (2006) berechneten für das gesamte Gewässersystem Schweiz die Existenz von rund 88'000 künstlichen, über 50 cm hohe Durchgangshindernisse. Diese stellen eine starke Beeinträchtigung für die Ausbreitung und Fischwanderung dar. Am meisten betroffen sind kleinere Fliessgewässer zwischen 600 und 1200 m ü. M. In der 59.7 km langen Töss sind 568 künstliche Querbauwerke vorhanden, wobei nur gerade 35 natürliche Barrieren vorkommen (Peter & Gonser 1998).

Hohe Querbauwerke (> 70 cm) in Salmonidengewässern sowie niedrige Querbauwerke (> 25 cm) in Cyprinidengewässern verunmöglichen die Aufwärtswanderung der Fische und stellen eines der massivsten ökologischen Defizite in den Fliessgewässern dar.

In den letzten Jahren wurden deutliche Anstrengungen unternommen, die Fliessgewässer wieder durchgängig zu gestalten und Querbauwerke wurden weggeräumt. Pionierhafte Projekte fanden beispielsweise am Alpenrhein (Nachrüstung des Kraftwerks Reichenau mit einer Fischtreppe), in der Reppisch, Ron LU, Önz (Kt. BE), im Liechtensteiner Binnenkanal sowie in der Kander statt. In der heutigen Wasserbaupraxis werden grosse Anstrengungen unternommen, Querbauwerke wegzuräumen und falls nötig, diese mit Blockrampen zu ersetzen. Die interkantonale Blockrampengruppe (Kt. AG, Kt. ZH, Kt. SO) ist ein Beispiel dieser Aktivitäten. Die wasserbauliche Forschung an der VAW beschäftigt sich intensiv mit Blockrampen. Sowohl klassische Blockrampen wie aufgelöste Blockrampen stehen dabei im Zentrum der Betrachtungen.

Nach unseren Einschätzungen wurde in den letzten Jahren eine beträchtliche Anzahl von Blockrampen mit starkem Gefälle gebaut. Die ökologische Wirksamkeit ist für diese Konstruktionen in Frage zu stellen. Bei der Passage einer Rampe spielen für den Fisch folgende Parameter eine wichtige Rolle:

- Gefälle
- Länge der Rampe
- Baumaterial

- Tiefenverhältnisse
- Existenz von Ruhebecken
- Temperatur des Wassers

In vielen EU-Ländern ist der Bau von Blockrampen stark in den Vordergrund gerückt und einige Dokumente widerspiegeln diese Wichtigkeit. Das Handbuch „Querbauwerke“ (2005) beschäftigt sich intensiv mit der Problematik der Fischdurchgängigkeit an Rampen. Es bleibt allerdings meistens bei Empfehlungen und die Grundlagen aus Feldexperimenten fehlen weitgehend.

Der intensive Bau von Blockrampen rechtfertigt eine Funktionskontrolle dieser Rampen. Dies beinhaltet ein Überprüfen der Funktionsfähigkeit. Alle aktuell im Gewässer vorkommenden Fischarten in unterschiedlichen Altersstadien und entsprechend ihrer Dominanz müssen dabei die Anlage überwinden können. Zusätzlich ist die Berücksichtigung der potenziell natürlichen Fischfauna nötig.

Für die Durchgängigkeit bei Rampen und Fischpässen stehen die Schwimmleistungen der einzelnen Fischarten im Vordergrund. Neuere Untersuchungen aus den USA (Haro 2002) dokumentieren die maximal von einer Fischart leistbaren Schwimmgeschwindigkeit und die zeitliche Dauer. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten ist die von einer Fischart überwindbare Entfernung geringer. Das Leistungsvermögen von Fischen gleicher Art und Grösse streut beträchtlich.

Die für die Fische relevanten Schwimmleistungen (Sprint, gesteigert, Dauer) sind nur als grobe Werte bekannt und bedürfen Ergänzungen. Vor allem ist es wünschenswert, die in unseren Gewässern wichtigen und gefährdeten Fischarten (z. B. Groppen, Äschen, Nasen etc.) besser zu charakterisieren.

Die vorgesehenen Arbeiten sollen Antwort auf folgende Fragen geben:

- was sind die Schwimmleistungen wichtiger einheimischer Fischarten, wie sind die kritischen Schwimmleistungen einzuschätzen
- welche Rampentypen sind erfolgreich und ermöglichen die Aufwärtswanderung der Fische. Gibt es einen Rampentypus, der sich für Fische besonders eignet
- wie gut funktionieren die steilen Blockrampen (gesetzte Rampen, geschüttete Rampen). Erfüllen sie die ökologischen Ansprüche der sensitiven Fischarten
- Empfehlung für Blockrampentypen abhängig von der Fischzonierung (Krenal, Rhithral, Potamal)
- wie verhalten sich Fische an Rampen. Kommt es zu zeitlichen Verzögerungen der Fischwanderungen
- wie sind mit Rampen durchwanderbare Strecken im Vergleich mit natürlichen Strecken ohne Hindernisse zu beurteilen

2.3 *Wiederbesiedlungsdynamik von revitalisierten Fließgewässern*

Flussrevitalisierungen haben in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen. Der Prozess der Wiederbesiedlung kann grundsätzlich mit einem Erholungsprozess nach einer Störung verglichen werden. Sobald die Störung nicht mehr länger aktiv ist (passive oder aktive Revitalisierungsmaßnahme, beginnt der Fluss sich zu erholen. Die

Geschwindigkeit, mit welcher sich ein Fließgewässersystem erholt, hängt von der Art der Störung sowie den spezifischen Prozessen im Einzugsgebiet ab. Aber auch die Länge der Störung sowie der Grad der Habitatszerstörung spielen eine wichtige Rolle (Detenbeck 1992). Die Kapazität für eine natürliche Erholung des Systems nach einer schweren Störung kann unter Umständen verloren gegangen sein (Kauffman et al. 1997). In solchen Fällen muss der Erholungsprozess in Form einer aktiven Revitalisierungsmassnahme gestartet werden (Gore 1985). Es bestehen somit zwei Fälle, die für die Theorie der Revitalisierungsökologie sowie für die Praxis der Revitalisierung von Bedeutung sind:

- die Erholung des Systems nachdem der Fluss sich selber revitalisiert hat
- die Erholung des Systems nach Revitalisierungsmassnahmen, die der Mensch initiiert hat

Von entscheidender Bedeutung ist es, womit die Erholungsprozesse verglichen und letztlich bewertet werden. Auch die Art der Revitalisierungsmassnahmen ist zu berücksichtigen. Grundsätzlich kann ein System mit folgenden Massnahmen wiederhergestellt werden (Woolsey et al. 2005, Weber & Peter 2006):

1. Wiederherstellung von strukturellen Massnahmen. Ziel: Erhöhung der Habitatstruktur, inkl. Wiederherstellung von Auen und Bachausdolung, Flussaufweigungen, Ausdolungen etc.
2. Wiederherstellung des Abflussregimes: der Natur nachgeahmtes Abflussregime
3. Wiederherstellung der longitudinalen Vernetzung (z. B. Einbau von Sohlrampen)
4. Wiederherstellung des natürlichen Geschiebehaushaltes

Die Geschwindigkeit der Erholung hängt von zeitlichen-örtlichen Mustern ab und kann sehr unterschiedlich ausfallen. Würmli & Boller (2004) beobachteten eine extrem rasche Erholung eines neu gebauten Seitengewässers innert wenigen Monaten. Zika & Peter (2002) fanden in einem kleinen Seitengewässer bereits nach 29 Tagen eine deutliche Zunahme der Fischdichte und -biomasse nach einer Gewässerstrukturierung mit Totholz. Auch in der strukturierten Melk beobachteten Jungwirth et al. (1995) eine sehr rasch Zunahme der Fischartenzahl von 10 auf 16, innerhalb eines Jahres. Im Liechtensteiner Binnenkanal ist die Besiedlungsdynamik jedoch rund sechs Jahre nach der Revitalisierung immer noch nicht abgeschlossen. Die Geschwindigkeit der Besiedlung verläuft also sehr unterschiedlich und hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von der Nähe von „hot spots“. Dies sind intakte Lebensgemeinschaften mit einem hohen Arten- und Dichtepotenzial.

Die Wiederbesiedlung kann mit verschiedenen Indikatoren, die hierarchisch unterschiedlich einzustufen sind, studiert werden. Es lassen sich den Aufbau betreffende (compositional indicators), funktionelle oder strukturelle Indikatoren unterscheiden.

Beispiele von Indikatorengruppen:

1. den Aufbau betreffend: Artenzahl und -diversität, Biomasse, Evenness, etc.
2. funktionelle Indikatoren: Wachstum, Produktion, Wanderrate, Überlebensrate
3. strukturelle Indikatoren: Altersklassen, Präsenz/Absenz verschiedener Gruppen

Je nach Gewässerregion sind angepasste Indikatoren auszuwählen.

Viele weltweit durchgeführten Revitalisierungen brachten nicht den entscheidenden Erfolg (Roni et al. 2005). Oft sind zwar die nötigen Habitate hergestellt und somit wieder vorhanden, ihre Besiedlung bleibt jedoch aus (www.rivermanagement.ch).

Dieses Subprojekt soll aufzeigen, wie die Besiedlungsdynamik nach durchgeführter Revitalisierungsmassnahme abläuft. Ein Hauptfokus liegt bei der Wiederherstellung der strukturellen Massnahmen (Aufweitungen, Gerinnestrukturierungen, Ausdolungen).

Folgende Resultate werden erwartet:

- gewisse Typen von Revitalisierungen werden nur ungenügend besiedelt
- die Wiederbesiedlung verläuft extrem unterschiedlich, sehr schnell bis sehr langsam
- die Nähe zum nächsten Artenpool (hot spots) spielt eine entscheidende Rolle
- Erklärungen, weshalb gewisse Flussstrecken nach der Revitalisierung nicht besiedelt werden
- unterschiedliche Besiedlungsmuster verschiedener Fischgilden
- der Grad der Strukturierungsmassnahmen entscheidet über den Revitalisierungserfolg
- die Wiederherstellung der lateralen Vernetzung ist für die Fischdichte und Biomasse ein wichtiger Parameter
- Schwall-Sunk Strecken können durch morphologische Aufwertungen verbessert werden. Ohne Veränderungen des Abflussregimes stellen sich jedoch nur begrenzte Erfolge ein.

3. Forschungsprojete des Laboratoire de constructions hydrauliques LCH-EPFL

3.1 Konstruktiver Hochwasserschutz und Lebensraumvielfalt (Teilprojekt A)

Jede flussbauliche Massnahme sollte grundsätzlich so ausgebildet werden, dass die Gewässerökologie im Rahmen der Möglichkeiten verbessert wird. Mit einer entsprechenden Gestaltung ist insbesondere ein möglichst grosser Strukturreichtum anzustreben, da dieser sich unbestritten positiv auf die Artenvielfalt in und an einem Gewässer auswirkt. Es geht mit Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten eine standortstypische Habitats- und Biodiversität im Fliessgewässer wieder herzustellen. Das Teilprojekt A hat zum Ziele, ein hydraulisch-morphologischer Vielfältigkeitsindex zu erarbeiten, welcher es erlauben soll, flussbauliche Massnahmen quantitativ bezüglich Strukturreichtums beurteilen zu können. Somit lassen sich verschiedene Projekt- und Revitalisierungsvarianten in einem bestimmten Gewässerabschnitt im Hinblick auf die Gewässerökologie miteinander vergleichen. Dieser Vielfältigkeitsindex wird gleichzeitig mit einem naturwissenschaftlichen Forschungsprojekt (EAWAG) mit der Diversität bzw. mit der Anzahl der Arten einer für einen Gewässertyp charakteristischen Lebensgemeinschaft in Beziehung gebracht. Dadurch lässt sich auch feststellen, wie eine ökologisch gestaltete flussbauliche Massnahme sich auf die Artenvielfalt auswirkt und welches Minimalziel erreicht werden sollte.

Für den Wasserbauer wäre es wie erwähnt sehr hilfreich, wenn der Strukturreichtum mit Hilfe eines einzigen hydraulischen und morphologischen Parameters quantifiziert werden könnte. Strukturreichtum beeinflusst unter anderem direkt die Strömungsvielfalt, welche im Wesentlichen das Resultat der räumlichen (und zeitlichen) Variabilität folgender Parameter ist:

- Abflusstiefe bzw. mittlere Abflusstiefe im Querschnitt
- Maximale Abflusstiefen
- Wasserspiegelbreite
- Mittlere Fliessgeschwindigkeit
- Sohlennahe Strömungsgeschwindigkeit (Schubspannungen)
- Benetzter Umfang
- Krümmung der Gerinneachse
- Neigung der Ufer

Es gibt bereits verschiedene Ansätze, welche den Zusammenhang zwischen einzelnen oder mehreren dieser Parameter und bestimmten Arten aufzeigen. So wurde beispielsweise in der Schweiz die Bachforellensömmerlinge in rund 80 Gewässer beprobt und mit der Variabilität der Wasserspiegelbreite oder maximalen Abflusstiefe in Zusammenhang gebracht. In Frankreich und Deutschland wurden in natürlichen Gewässerabschnitten die statistischen Verteilungen von maximalen Geschwindigkeiten und Sohlenschubspannungen untersucht. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass sich diese Parameter in allen untersuchten Gewässern mit dem Abfluss nahezu gleich verändern. Ein Modell zur statistischen Vorhersage der Abflusstiefenverteilung in natürlichen Gewässern wurde ebenfalls entwickelt, mit dem Ziele, die in-situ Messungen auf einige Stichproben zu beschränken (für zwei Abflüsse). Diese Untersuchungen deuten darauf hin, dass Geschwindigkeiten, Sohlenschubspannungen und Abflusstiefen in natürlichen Gewässern eine typische Verteilung aufweisen.

Zur Beurteilung von Fischgewässern werden seit längerem sogenannte Habitatsqualitätsindexe (HQI) verwendet, welche aus einer Vielzahl von chemischen, biologischen sowie physikalischen Parameter errechnet werden können. Die einzelnen Parameter, welche den Lebensraum der Fische beeinflussen, können beispielsweise in Zustandsklassen eingeteilt und mit einem Punktesystem bewertet werden. Der durchschnittliche Wert aller berücksichtigten Parameter, ergibt schliesslich den Habitatsqualitätsindex. Dieser kann dann mit der Fischbiomasse in Verbindung gebracht werden. Verschiedene andere Modelle zur Bestimmung eines Habitatsqualitätsindex existieren, welche lokal (für einen bestimmten Fluss) oder regional (mehrere Flüsse) sein können. Bei diesen Modellen werden die verschiedenen Lebensraumeigenschaften (z.B. Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe, Sohlengranulometrie) einzeln betrachtet und die zugehörigen Präferenzen für bestimmte Fische ermittelt.

Ziel des Teilprojektes A ist es also, einen hydraulisch morphologischen Vielfältigkeitsindex zu erarbeiten, welcher den Strukturreichtum des Gewässers charakterisiert und die wesentlichen Parameter wie Abflussgeschwindigkeit, Sohlenschubspannungen, Abflusstiefe, Sohlenquerneigung, Uferneigung etc. berücksichtigt. Dies geschieht mit Feld- und Labormessungen und Analysen für verschiedene Gewässertypen. In Zusammenarbeit mit der EAWAG wird der Vielfältigkeitsindex mit der Biodiversität verknüpft.

Die erwarteten Resultate des Teilprojektes A sollen unter anderem auf nachfolgende Fragen Antwort geben:

- Kann der hydraulische und morphologische Strukturreichtum in einem Gewässer mit einem globalem Vielfältigkeitsindex quantifiziert werden, welcher sich mit der Biodiversität verknüpfen lässt?
- Wie hängt dieser Vielfältigkeitsindex von den verschiedenen Gewässertypen und der Abflussmenge ab?
- Wie müssen konstruktive Hochwasserschutzmassnahmen ausgebildet werden, damit ein möglichst grosser Strukturreichtum erreicht wird?
- Mit welchen Massnahmen kann der grösste Strukturreichtum resp. Vielfältigkeitsindex erreicht werden?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Revitalisierungsgrad resp. Natürlichkeitsgrad eines Gewässers oder seinem ökologischer Zustand und dem hydraulisch-morphologischen Vielfältigkeitsindex?

3.2 *Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk (Teilprojekt B)*

En contrebas des restitutions d'aménagements hydroélectriques à accumulation, les rivières subissent des variations de débits imposées par les impératifs de production d'électricité. Ainsi, en période de forte demande, les débits sont très importants alors qu'entre temps ils sont réduits au minimum. Il n'est pas rare que le rapport de l'un à l'autre dépasse 1/10. Cette alternance se déroule plusieurs fois par jour, avec des variations très rapides.

Ce régime hydrologique artificiel, induit des conditions hydrauliques incompatibles avec l'équilibre de l'écosystème aquatique. En effet, les débits lâchés par les turbines s'écoulent avec des vitesses et des hauteurs d'eau comparables à celles imposées par des crues occasionnelles. Sous cette action impulsive, la morphologie et les structures du lit sont détruites: les bancs de granulats sont entraînés avec les végétaux et les macro invertébrés qui les occupent. Les poissons dont le mouvement ascensionnel n'est plus possible, se réfugient dans les zones où les vitesses sont réduites, soit au voisinage du fond et des parois et sur les secteurs temporairement inondés. Dans ce dernier cas, il sont piégés par la réduction trop brutale du débit. A cela s'ajoutent des effets de température de l'eau et de colmatage du lit.

Dans une perspective de revitalisation, 2 catégories de mesures sont envisageables, de manière complémentaire. L'action sur les causes vise à reconsidérer les conditions d'exploitation, pour des variations moins intenses et plus graduelles. L'action sur le milieu consiste à créer des configurations favorables à la reconstitution d'habitats aquatiques et de refuges. Les idées et tentatives vont dans le sens de la mise en place de structures dans le lit, et d'aménagement de baies dans les berges.

Le travail de recherche prévu dans le volet B a pour objectif d'imaginer et de tester de pareils aménagements. Une fois son étendue clairement ciblée par synthèse de l'étude bibliographique, une analyse théorique sera effectuée afin de générer des situations potentielles. Sur ces bases la recherche sera effectuée par des essais en laboratoire. Les solutions pertinentes seront testé en conditions réelles, sur une rivière soumise aux éclusées.

Les résultats attendus du volet B devraient répondre entre autre aux questions suivantes :

- Quelles sont les conditions d'exploitation dommageables?
- Où se réfugient les poissons de manière prioritaire ?
- Comment les attirer dans des refuges ?
- Comment configurer le refuge pour qu'il soit sécurisant et persistant ?

3.3 *Morphologie von naturnah gestalteten Einmündungen von Seitengewässern (Teilprojekt C)*

Neben den morphologischen Defiziten in den Hauptgewässern durch die Korrekturen sehr technisch gestaltet resp. kanalisiert worden. An der Rhone beispielsweise anzutreffen sind oftmals sehr glatte, schräg einmündende gemauerte Kanäle, welche teilweise noch einen Absatz bei der Einmündung haben. Ziel dieser sehr technischen Gestaltung war damals ein möglichst optimaler Eintrag des Geschiebes.

Im Rahmen von Revitalisierungen sollen diese Mündungen wieder durchgängig gemacht und morphologisch wieder naturnah gestaltet werden.

Die insbesondere in geschiebeführenden Flüssen noch wenig bekannte Interaktion zwischen der Ausgestaltung einer Einmündung und des Geschiebetransportes soll mit dem Teilprojekt C mit systematischen Modellversuchen und theoretischen Analysen studiert werden.

Ziel ist es eine bessere Kenntnis der Entwicklung der Morphologie von Einmündungen unter der Berücksichtigung vom Abflussverhältnis Zufluss/Hauptfluss und des Geschiebetransport für verschiedene Konfigurationen von kanalisierten Einmündungen bis hin zu aufgeweiteten Einmündungsbereichen zu haben. Dabei spielt die Hochwassersicherheit im Mündungsbereich eine grosse Rolle. Mit den wissenschaftlichen Untersuchungen sollen Mündungen mit möglichst natürlicher Morphologie gefunden werden, welche für bestimmte Verhältnisse zwischen Hauptfluss und Seitengewässer den Hochwasserabfluss und den Geschiebetransport gewährleisten.

Die erwarteten Resultate des Teilprojektes C sollen auf folgende Fragen Antwort geben:

- Wie beeinflusst eine naturnah gestaltete, aufgeweitete Einmündung eines Seitengewässers die Abflussverhältnisse und den Geschiebetransport im Hauptfluss und wie erfolgt der Geschiebeeintrag durch das Seitengewässer?
- Welches sind die optimalen Kombinationen von Aufweitungen im Hauptfluss und im Seitengewässer sowie dessen Einmündungswinkel bezüglich Geschiebetransport und Hochwassersicherheit?
- Welche Sohlenmorphologie entwickelt sich im Einmündungsbereich und welches sind die bettbildenden Abflüsse?
- Welche Elemente wie Lenkbuhnen sind nötig um unzulässige Ufererosionen im Einmündungsbereich zu verhindern?
- Wie müssen die Einmündungsbereiche gestaltet werden um den grössten ökologischen und flussbaulichen Gewinn zu erhalten?

3.4 *Stabilität und Durchgängigkeit von Blockrampen (Teilprojekt D)*

Blockrampen werden seit längerer Zeit in schweizerischen Fließgewässern gebaut, um Abschnitte mit grösserem Gefälle zu überwinden und unzulässige Sohlenerosionen zu verhindern. Zudem wurden verschiedentlich Schwellenabstürze durch Blockrampen ersetzt.

Obwohl für die Bemessung von Blockrampen verschiedene Methoden seit längerem bekannt sind, mussten verschiedentlich bei grösseren Hochwassern das Versagen von Blockrampen beobachtet werden. Ein Grund sind sicher die komplexen dreidimensionalen Strömungsverhältnisse, welche zu einer ungleichmässigen Beanspruchung der Blockrampen führen. Zudem sind viele der ausgeführten Blockrampen schwer für Fische durchgängig.

Ziel des Teilprojektes D ist es deshalb, bestehende und neue Blockrampen so auszubilden, dass die Fischdurchgängigkeit sowie der Widerstand gegen Versagen im Überlastfall verbessert werden.

Die erwarteten Resultate des Teilprojektes D sollen auf folgende Fragen Antwort geben:

- Wie muss die Morphologie von bestehenden und neuen Blockrampen gestaltet werden, so dass die Fischdurchgängigkeit verbessert wird?
- Wie kann durch diese ökologisch optimale Morphologie auch der Widerstand im Überlastfall erhöht werden?
- Wie sind die bestehenden Bemessungsverfahren anzupassen, damit der ungleichmässigen Belastungsverteilung auf solch gestalteten Blockrampen Rechnung getragen wird?

4. Forschungsprojekte der WSL: Auswirkungen lateraler und longitudinaler Vernetzung von Flussläufen auf den Genfluss naturschutzrelevanter, flussbegleitender Arten

4.1 *Einleitung*

Im Rahmen des Forschungsprojektes « Integrales Flussgebietsmanagement » soll in zwei Dissertationen untersucht werden, inwieweit Revitalisierungsmassnahmen die funktionelle Vernetzung für zwei naturschutzrelevante Organismen verbessern können. Im Zentrum der Untersuchung steht dabei die Überprüfung der in der Praxis angewandten Annahmen, dass (1) neu geschaffene Lebensräume, welche nahe bei bereits existierenden, natürlichen Lebensräumen des selben Typs liegen, schneller durch habitatstypische Arten besiedelt werden können als weit weg liegende und (2) gut vernetzte Habitate bzw. neu geschaffene Flussausweitungen in lateral gut vernetzten Abschnitten eine höhere Biodiversität aufweisen werden.

In diesen Projekten wird eine Wirkungskontrolle für laterale und longitudinale Vernetzung auf populationsgenetischer Basis vorgeschlagen. Diese hat den Vorteil, dass sie nicht einseitig auf (biologisch möglicherweise wenig aussagekräftige) Landschaftsstrukturmasse (landscape metrics) abstützt, sondern „Isolation“, „Flaschenhals“ und „Genfluss“ zwischen Populationen – also kurz die Vernetzung - direkt misst (Pither and

Taylor, 1998; Stevens et al., 2004; Amat et al., 2005). Dadurch kann die biologische Relevanz von (1) realisierten Vernetzungsprojekten und (2) von einfachen Indikatoren der Landschaftsstruktur überprüft werden. Zudem soll untersucht werden, inwieweit bisher in der Planung von Vernetzungsprojekten verwendete Modelle, welche sich ausschliesslich auf Landschaftsstrukturmasse abstützen, durch den Einbezug von populationsbiologischen Daten der zu fördernden Arten verbessert werden können (Chovanec and Waringer, 2001; Chovanec et al., 2004; Radford and Bennett, 2004).

Im Zentrum der Untersuchung steht die Überprüfung folgender für die Praxis relevante Hypothesen:

- (1) nahe bei naturnahen Gebieten liegende Aufweitungen weisen eine höhere Biodiversität auf und werden schneller durch neue Arten besiedelt als weit weg liegende und
- (2) lateral gut vernetzte Flussabschnitte (gut gestaltete Einmündungen bzw. Aufweitungen) weisen eine höhere Biodiversität auf als schlecht vernetzte Flussabschnitte.

4.2 *Problemstellung*

Revitalisierungsmassnahmen von Fliessgewässern spielen eine bedeutende Rolle für die Förderung flussbegleitender, naturschutzrelevanter Arten. Betreffend biologischer Aufwertung durch Revitalisierungsmassnahmen wird in der Regel von der Annahme ausgegangen, dass (1) nahe bei naturnahen Gebieten liegende Aufweitungen eine höhere Biodiversität aufweisen und zusätzlich schneller durch neue Arten besiedelt werden können als weit weg liegende und (2) lateral gut vernetzte Flussabschnitte bzw. Ausweitungen in lateral gut vernetzten Abschnitten eine höhere Biodiversität aufweisen werden (siehe (Tockner et al., 1999; Uezu, Metzger, and Vielliard, 2005).

Für die Überprüfung, inwieweit die bei Flussrevitalisierungen realisierten baulichen Eingriffe neue Habitate für spezielle Organismen geschaffen oder zur Vernetzung von Lebensräumen geführt haben, sind spezifische Wirkungskontrollen entwickelt worden. Als Indikatoren wurden einerseits Landschaftsstrukturmasse (landscape metrics) und andererseits Vorkommen und Habitatsbindung der in den revitalisierten Abschnitten angetroffenen Lebewesen verwendet (Rohde, 2004). Dadurch konnten neue Vorkommen und Veränderungen der Populationsgrössen erfasst und in Beziehung zu den durchgeführten Massnahmen gesetzt werden.

Solche Wirkungskontrollen basieren meist auf der Untersuchung struktureller Vernetzung, machen aber kaum Aussagen über die funktionelle Vernetzung. Die funktionelle Vernetzung (functional connectivity) bezeichnet den effektiven genetischen Austausch zwischen Populationen. Diese integriert das Migrationsverhalten der Arten (Pollflug, Samenflug, Wanderung von Adulttieren und Larven etc.) und die „Durchlässigkeit“ einer heterogenen Landschaft für die Migration in ökologisch relevanten Raum- und Zeitdimensionen.

4.3 Forschungsfragen

- H1: Bauliche Massnahmen zur Revitalisierung schaffen grosse, für die Keimung der untersuchten Pflanzenart notwendige Pionierstandorte. Diese Standorte erfüllen die ökologischen Bedingungen für die Keimung der naturschutzrelevanten Art, so dass sich diese gegenüber eingeführten Pappelarten und/oder invasiven Arten, wie z.B. *Impatiens glandulifera*, durchsetzen kann.
- H2: Laterale Vernetzung fördert die Besiedlung durch die naturschutzrelevanten Arten und erhöht somit den Genfluss zwischen Populationen.
- H3: Laterale Vernetzung führt gegenüber unvernetzten Habitaten zu einem erhöhten Anteil von besiedelten Habitaten.
- H4: Die Mortalitätsrate während der Larvalentwicklung der untersuchten Tierart ist höher bei isolierten als bei vernetzten Populationen.

5. Forschungsprojekte der VAW-ETHZ : Flussgebietsmodellierung

5.1 Ausgangslage

Im Rahmen des transdisziplinären Projektes „Nachhaltiger Umgang mit Fließgewässern - Beispiel Rhone & Thur“ unterstützte das BWG für die Periode 2002-2005 das Projekt „Flussgebietsmodellierung – Grundlagen für grosse Flussbauprojekte“ der VAW. Das Ziel dieses Projektes war, die Dimensionierungswerkzeuge, die zur Lösung von flussbaulichen Fragestellungen eingesetzt werden, zu verbessern.

Der ursprüngliche Konzeptvorschlag umfasste 5 Module, von denen zwei in Angriff genommen werden konnten. Das war zum einen das umfangreiche zentrale Rechenmodul BASEMENT, das die softwaremässige Infrastruktur für die themenbezogenen Submodelle zur Verfügung stellt. Zum anderen wurde das Submodul „Dreidimensionale numerische Simulation von Kolkvorgängen und der Bildung von verzweigten Gerinne“, im Rahmen einer Dissertation mit entsprechenden Grundlagen und Werkzeuge erarbeitet, damit dreidimensionale Strömungen mit freier Oberfläche und beweglicher Sohle numerisch simuliert werden können.

Das Softwaresystem BASEMENT umfasst drei Modelle: BASEchain für eindimensionale Betrachtungen, BASEplane für horizontalzweidimensionale Ansätze und BASEspace zur Lösung der dreidimensionalen Gleichungen. Ziel ist es, die drei Modelle so zu vernetzen, dass sie miteinander beliebig kombiniert werden können.

Im April 2006 war die erste Phase der Entwicklung von BASEchain und BASEplane abgeschlossen. Das Produkt heisst BASEMENTseq V1.0 und steht zur freien Verfügung. Die Software kann inklusive der zugehörigen Dokumentation von der Webpage www.basement.ethz.ch.

Für BASEspace, das im Rahmen einer Dissertation erstellt wird, sind erst grundlegende Parameterstudien zu den Themen Gittergenerierung, Sedimenttransportformeln, Turbulenzmodelle und Parallelisierbarkeit des Codes durchgeführt worden. Eine Integration von BASEspace in BASEMENT kann erst in der Periode 2007-2008 erfolgen.

Die nachfolgend beschriebenen Forschungsvorhaben basieren auf dieser Ausgangslage, weil sie mit Blick auf BASEMENT konzipiert wurden. So kann gewährleistet werden,

dass deren Erkenntnisse softwaremässig direkt umgesetzt werden. Dies betrifft vor allem Wissenslücken bei der Beschreibung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse.

5.2 Weiterentwicklung der Software –BASEMENT II

- Reduzierte Gleichungen

Der Rechenaufwand für eine numerische Simulation kann durch verschiedene Vereinfachungen der Modellgleichungen deutlich reduziert werden, wobei aber ein Verlust an Genauigkeit der Resultate in Kauf genommen werden muss. In bestimmten Fällen oder im Rahmen von Voruntersuchungen ist diese Vereinfachung sinnvoll und führt dennoch zu qualitativ aussagekräftigen Resultaten.

- Sekundärströmungen

Im zweidimensionalen tiefengemittelten Modell wird die vertikale Geschwindigkeitskomponente nicht berücksichtigt. In Fliessgewässern gibt es neben der primären Strömung in Fliessrichtung aber auch so genannten Sekundärströmungen, wie z.B. der Rotation der Strömung von der Oberfläche in Richtung der Gerinnesohle im Bereich von Kurven. Verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Sekundärströmung in Abhängigkeit der Primärströmung sind vorhanden. Bezüglich des Sedimenttransports, welcher grösstenteils durch die Geschwindigkeitstrajektorien dominiert wird, ist durch die Berücksichtigung von Sekundärströmungen eine bessere Wiedergabe von Gerinneveränderungen zu erwarten.

- Parallelisierung / Effizienzsteigerung

Durch eine Optimierung der implementierten Berechnungsalgorithmen und durch Verteilung der Berechnungsaufgaben auf verschiedene Prozessoren (Parallelisierung) kann die Berechnungsdauer erheblich gesenkt werden. Dies ist vor allem bei grosser räumlicher Ausdehnung des Berechnungsgebiets oder einer langen Berechnungsperiode wünschenswert.

- Zentrale Datenhaltung

Zur vereinfachten Verwaltung von Ausgangsdaten, Randbedingungen und Berechnungsergebnissen und zur Unterstützung des Simulationsprozesses ist eine zentrale Speicherung der Daten in einer Datenbank sinnvoll. Durch deren definierte und transparente Struktur wird der Austausch von Daten zu anderen Systemen deutlich vereinfacht.

- Werkzeuge zur Datenaufbereitung / Auswertung

Einerseits liegen die Ausgangsdaten häufig nicht in der gewünschten Qualität oder in der gewünschten Form vor und müssen vor der Verwendung überarbeitet werden. Andererseits sind in den Resultatdateien meistens mehr Informationen enthalten als eigentlich benötigt werden. Entsprechend bedarf es zur Aufbereitung und Auswertung der Daten einfacher aber effektiver Werkzeuge.

- Integration 3d

In Fliessgewässern gibt es Bereiche mit lokal ausgeprägten dreidimensionalen Strömungen, wie z.B. bei einem Brückenpfeiler, wofür zur korrekten Berechnung das dreidimensionale Modell verwendet werden muss. Die Strömung in der näheren Umgebung

kann aber häufig mit einem zweidimensionalen Modell genügend genau und effizient wiedergegeben werden, wodurch Randbedingungen für das lokale dreidimensionale Modell bereitgestellt werden können. Bei einer derartigen Integration von zwei verschiedenen Modellen ist vor allem die Formulierung des Austausches über die jeweiligen Gebietsränder sehr anspruchsvoll.

5.3 *Wissenschaftliche Teilprojekte*

Mit dem gestiegenen Umweltbewusstsein und aufgrund der Erfahrungen und Lehren aus den grossen Hochwasserereignissen von 1987, 1999, 2000 und 2002 wurde erkannt, dass den Flüssen mehr Raum zugestanden werden muss, damit ihre Transportfunktion (Ableitung von Hochwasser und Sedimenten) sowie ihre ökologische Funktion (Bildung und Vernetzung von Lebensräumen) gewährleistet ist. Kanalisierte Flüsse werden deshalb heute in der Schweiz nach Möglichkeit aufgeweitet. Dabei besteht vermehrt der Wunsch, den Aufweitungsprozess dem Fluss zu überlassen, also eine Gerinneverbreiterung durch seitliche Erosion zuzulassen.

Es ist jedoch nicht möglich, dem Fluss einen unbegrenzten Freiraum zu lassen, da sich Siedlungen, Strassen und anderen Infrastrukturanlagen in Flussnähe befinden. Infolgedessen sind die Aufweitungsmöglichkeiten begrenzt und die Ufer müssen entsprechend gesichert werden, damit der Fluss die ihm zugewiesenen Grenzen nicht überschreitet.

Breite Flüsse können sich – entsprechend ihrer natürlichen Tendenz – verzweigen oder zu mäandrieren beginnen. Die Entwicklung des Gerinnes wird dadurch dynamisch. Dies ist aus ökologischer Sicht sehr erwünscht, stellt jedoch erhöhte Anforderungen an den Schutz der Ufer. Da ein einzelner Gerinnearm einen seitlichen Schutzdamm schon bei einem kleineren Hochwasser lokal sehr hoch beanspruchen kann, muss die Uferlinie vorsorglich auf der ganzen Länge gesichert werden. Eine andere Alternative besteht darin, eine Pufferzone einzuplanen, welche durch eine Beurteilungslinie begrenzt wird. Sobald der Fluss diese Linie erreicht, werden Sicherungsmassnahmen in die Wege geleitet und gegebenenfalls ein Hochwasserschutz auf der Interventionslinie errichtet.

Zur Bestimmung der Grösse dieser Pufferzone sollte abgeschätzt werden können, in welchem Zeitraum das breitere Gerinne den Hochwasserschutzdamm erreichen kann. Dabei spielt die seitliche Entwicklung bzw. die Seitenerosion eine wichtige Rolle (s. Abb.1). Während bezüglich Seitenerosion in sandführenden Flüssen zahlreiche Untersuchungen weltweit durchgeführt worden sind, sind die Kenntnisse bezüglich Seitenerosion in kiesführenden Flüssen jedoch begrenzt.

Im Rahmen dieses Projektes Flussgebietsmodellierung sollen die zeitliche und räumliche Entwicklung der Seitenerosion untersucht sowie Massnahmen für einen wirkungsvollen Schutz von Infrastrukturanlagen entlang aufgeweiteter kiesführender Flussläufe entwickelt werden. Damit werden Grundlagen zur quantitativen Beschreibung des Seitenerosionsprozesses erarbeitet, welche der Gefahrenbeurteilung dienen. Daneben werden Schutzmassnahmen entwickelt und geprüft, um die Seitenerosion zu kontrollieren und Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen zu verhindern.

In einem ersten Teilprojekt, werden die grundlegenden Prozesse anhand von hydraulischen Versuchen untersucht. Im zweiten Teilprojekt sollen die gewonnenen Erkenntnisse so aufgearbeitet werden, dass sie in das numerische Modell BASEMENT einge-

baut werden können. Die Resultate sollen mit dokumentierten Naturdaten verglichen werden, welche aus verschiedenen Flüssen (Töss, Thur, Aare, Moesa, Bünz, Tresa) zur Verfügung stehen.

Bibliographie

- Baran, P., Delacoste, M., Lascaux, J.M., & Belaud, A. 1991.** Relationships between habitat features and brown trouts populations (*Salmo trutta* L.) in Neste-Daure Valley. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, 331:321-340.
- Bjornn, T. C. & Reiser, D. W. 1991.** Habitat requirements of salmonids in streams. Influences of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitats. *American Fisheries Society Special Publication* 19:83-138.
- Tejerina-Garro, F.L., de Merona, B., Oberdorff, T., & Hugenny, B. 2006.** A fish-based index of large river quality for French Guiana (South America): method and preliminary results. *Aquatic living resources* 19(1):31-46.
- Schleiss, A. 2005.** Flussbauliche Hochwasserschutzmassnahmen und Verbesserung der Gewässerökologie - Vorschlag eines hydraulisch-morphologischen Vielfältigkeitsindexes. *Wasser-Energie-Luft*, 7/8:195-200.
- Woolsey S, Weber C, Gonser T, Hoehn E, Hostmann M, Junker B, Roulier C, Schweizer S, Tieg S, Tockner K, Peter A. 2005.** Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ: Zurich.
- HARO, A. 2000.** Downstream movement and passage of silver eel in the Connecticut mainstream. Turners Falls MA, USA. S.O. Conte Anadromous Fish Research Center.
- Handbuch Querbauwerke. 2005.** Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Nordrhein-Westfalen: 212 pp.
- Notter, B. et al. 2006.** Ökomorphologischer Zustand der Schweizer Fliessgewässer: Zwischenauswertung aufgrund der Erhebungen aus 18 Kantonen.
- Peter, A. & Gonser, T. 1998.** The Toess as habitat. *Eawag news*, 44E:18-20.
http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/gsch/bericht_oekomorphologie_06d.pdf
- Boller, L. & Würmli, D. 2004.** Sukzession der Fischfauna in einem neu geschaffenen Seitengerinne der Aare am Beispiel des Wildibachs. 94 pp. Diplomarbeit ETHZ/EAWAG.
- Detenbeck, N. E. 1992.** Recovery of temperate-stream fish communities from disturbance: A review of case studies and synthesis of theory. *Environmental Management* 16: 33-53.
- Gore, JA. 1985.** Introduction. The restoration of rivers and streams - Theories and experience, Gore JA (eds). Butterworth Publishers: Boston.
- Jungwirth, M, Muhar S, Schmutz S. 1995.** The effects of recreated instream and ecotone structures on the fish fauna of an epipotamal river. *Hydrobiologia* 303: 195-206.
- Roni P, Hanson K, Beechie TJ, Pess GR, Pollock MM, Bartley DM. 2005.** Habitat rehabilitation for inland fisheries. Global review of effectiveness and guidance for rehabilitation of freshwater ecosystems. FAO: Rome.
- Woolsey S, Weber C, Gonser T, Hoehn E, Hostmann M, Junker B, Roulier C, Schweizer S, Tieg S, Tockner K, Peter A. 2005.** Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ: Zurich.
- Weber, C. & Peter, A. In Vorbereitung.** Recovery rates in riverine fish assemblages following physical habitat rehabilitation: A literature review.
- Zika U & Peter A. 2002.** The introduction of woody debris into a channelized stream: effect on trout populations and habitat. *River Research and Applications* 18: 355-366
- AMAT, J. A., M. A. RENDON, M. RENDON-MARTOS, A. GARRIDO, AND J. M. RAMIREZ. 2005.** Ranging behaviour of greater flamingos during the breeding and post-breeding periods: Linking connectivity to biological processes. *Biological Conservation* 125: 183-192.

- CHOVANEC, A., AND J. WARINGER. 2001.** Ecological integrity of river-floodplain systems-assessment by dragonfly surveys (Insecta : Odonata). *Regulated Rivers-Research & Management* 17: 493-507.
- CHOVANEC, A., J. WARINGER, R. RAAB, AND G. LAISTER. 2004.** Lateral connectivity of a fragmented large river system: assessment on a macroscale by dragonfly surveys (Insecta : Odonata). *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 14: 163-178.
- PITHER, J., AND P. D. TAYLOR. 1998.** An experimental assessment of landscape connectivity. *Oikos* 83: 166-174.
- RADFORD, J. Q., AND A. F. BENNETT. 2004.** Thresholds in landscape parameters: occurrence of the white-browed treecreeper *Climacteris affinis* in Victoria, Australia. *Biological Conservation* 117: 375-391.
- ROHDE, S. 2004.** River Restoration: Potential and limitations to re-establish riparian landscapes. Assessment & Planning. Diss. ETH No. 15496, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, ETHZ Zurich.
- STEVENS, V. M., E. POLUS, R. A. WESSELINGH, N. SHTICKZELLE, AND M. BAGUETTE. 2004.** Quantifying functional connectivity: experimental evidence for patch-specific resistance in the Natterjack toad (*Bufo calamita*). *Landscape Ecology* 19: 829-842.
- TOCKNER, K., F. SCHIEMER, C. BAUMGARTNER, G. KUM, E. WEIGAND, I. ZWEIMULLER, AND J. V. WARD. 1999.** The Danube restoration project: Species diversity patterns across connectivity gradients in the floodplain system. *Regulated Rivers-Research & Management* 15: 245-258.
- UEZU, A., J. P. METZGER, AND J. M. E. VIELLIARD. 2005.** Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation* 123: 507-519.

Verdankung

Dieser Beschrieb des Forschungsprojektes beruht auf den Projektgesuchen, welche von Eawag, LCH, VAW und WSL verfasst wurden.

Adresse der Autoren

Prof. Dr. Anton Schleiss
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
 Station 18, 1015 Lausanne
 +41-21-693 23 85
<http://lchwww.epfl.ch>
anton.schleiss@epfl.ch

Dr. Armin Peter
 Eawag aquatic research
 6047 Kastanienbaum
 +41-41-349 21 36
armin.peter@eawag.ch

- N° 21 2005 Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues
- N° 22 2005 INTERREG IIIB - Projet ALPRESERV. Conférence sur la problématique de la sédimentation dans les réservoirs - Gestion durable des sédiments dans les réservoirs alpins
- N° 23 2005 Master of Advanced Studies (MAS) in hydraulic schemes
Collection des articles des travaux de diplôme
- N° 24 2006 S. Sayah
Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion
- N° 25 2006 P. Manso
The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets
- N° 26 2006 M. Andaroodi
Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool
- N° 27 2006 Symposium érosion et protection des rives lacustres
Bases de dimensionnement des mesures de protection des rives lacustres
- N° 28 2007 A. Vela Giró
Bank protection at the outer side of curved channels by an undulated concrete wall
- N° 29 2007 F. Jordan
Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue
- N° 30 2007 P. Heller
Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples
- N° 31 2007 P. Heller
Analyse qualitative des systèmes complexes à l'aide de la méthode de Gomez & Probst
- N° 32 2007 J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System II - Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques
- N° 33 2007 Symposium - Flussbauliche Massnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft /
Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la protection contre les crues, l'environnement, la société et l'économie



ISSN 1661-1179

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, Bât. GC, Station 18, CH-1015 Lausanne
<http://lchwww.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch