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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 98 (2006)

Heft: 4

Artikel: Mehrzweckprojekt an Flüssen : Synergien zwischen Ökologie und Energieerzeugung

Autor: Heller, Philippe / Schleiss, Anton / Bollaert, Erik

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939371

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 23.08.2025

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

Mehrzweckprojekt an Flüssen: Synergien zwischen Ökologie und Energieerzeugung

■ *Philippe Heller, Anton Schleiss, Erik Bollaert, Marc Pellaud, Rodolphe Schlaepfer*

Zusammenfassung

Im letzten Jahrhundert sind viele Flüsse in Europa ausgebaut und kanalisiert worden. Ihre wesentliche Aufgabe bestand darin, eine ausreichende Hochwassersicherheit zu gewährleisten und Energie zu liefern. Viele Flüsse weisen daher heutzutage eine Reihe von Defiziten auf. So ist die damals ausreichende Hochwassersicherheit auf Grund der Klimaveränderungen sowie der Urbanisierung stetig gesunken. Ein oftmals künstliches hydraulisches Regime hat zudem die Morphologie und Flussökologie nachhaltig beeinträchtigt. Ausbaumassnahmen haben ihrerseits zu einer geringeren Freizeitattraktivität eines Gewässers beigetragen und die Einheit von Fluss und Landschaft scheint vielerorts nicht mehr gegeben zu sein. Dennoch stellen die Gewässer nach wie vor ein grosses Entwicklungspotenzial dar und sind für die landwirtschaftliche Bewässerung, Trinkwasserversorgung, Energieproduktion oder Schifffahrt von grosser Bedeutung.

Die aufgezeigten Mängel können jedoch beispielsweise mit einem Mehrzweckprojekt verringert und das vorhandene Potenzial besser genutzt werden. Ein Mehrzweckprojekt muss verschiedensten Interessen und Interessengruppen gerecht werden und wird daher sehr komplex. Dies erfordert häufig eine Neu-Definition der optimalen Lösung bzgl. Planung und Bewirtschaftung sowie einen innovativen vernetzten Lösungsansatz.

Die in diesem Beitrag entwickelte Lösungsstrategie basiert auf einer qualitativen Analyse der Schlüsselvariablen eines Projektes. Eine anschliessende quantitative Analyse gibt dann spezifische Antworten hinsichtlich Projektgrösse und Bewirtschaftungsmanagement. Ein optimierter Betrieb des Mehrzweckspeichers kann die Voraussetzungen für ein naturnahes hydraulisches Regime im flussabwärts liegenden Gewässerabschnitt schaffen – und dies ohne bedeutende Energieverluste (weniger als 10%). Wegen des nahezu gleich bleibenden Speicherniveaus während der Sommermonate erlaubt ein optimierter Mehrzweckspeicher zudem die Entwicklung von Freizeitaktivitäten sowie die Verbesserung der ökologischen Situation.

Résumé

Durant les derniers siècles, de nombreux cours d'eau en Europe ont été largement canalisés et leur tracé modifié. Ces travaux devaient assurer la sécurité vis-à-vis des crues ou permettre de produire de l'énergie.

Ces même cours d'eau présentent aujourd'hui des déficits marqués. Les changements climatiques et plus certainement l'urbanisation croissante montrent toujours des problèmes à l'égard des crues. Les morphologies artificielles et la constance du régime hydraulique génèrent un appauvrissement de leur état écologique. En conséquence, leur attrait pour les activités de loisirs est réduit et ils sont tenus déconnectés de leur environnement. Toutefois, leur pauvreté actuelle est synonyme de potentiel de réhabilitation et de développement. Les cours d'eau demeurent, en effet, vitaux pour l'agriculture, l'eau potable ou la navigation. La production énergétique est également d'actualité.

Réduire les déficits tout en développement le potentiel des cours d'eau est possible avec un aménagement fluvial à buts multiples. La prise en compte, dès la conception, des différents buts recherchés avec leurs interactions réciproques, rend un tel projet hautement complexe. La recherche de solutions optimales, tant pour la conception que la gestion, est plus difficile et requiert de nouvelles approches méthodologiques.

L'approche développée est basée sur une étude qualitative qui met en évidence les facteurs-clés du projet. Dans un second temps, une étude quantitative donne les réponses spécifiques quant à la taille et la gestion de l'aménagement. L'optimisation de la gestion permet de reproduire un régime hebdomadaire hydraulique proche d'un régime naturel sans générer de perte significative pour la production d'énergie (moins de 10%). Cette gestion, qui offre un niveau stable dans le réservoir pendant la période estivale, permet également un développement d'activités sociales autour de l'aménagement. L'écologie tire profit d'un tel projet, tant par la réduction du marnage aval que par un développement spécifique sur le site de l'aménagement.

1. Einleitung

1.1 Vernetztes Problem

Der Raum für eine natürliche Entwicklung eines Fliessgewässers hat wegen des Bevölkerungswachstums in den letzten Jahrhunderten ständig abgenommen. Siedlungsgebiete befinden sich heutzutage oftmals in direkter Nähe zum Gewässer oder in der Aue. In den Industrieländern sind viele Gewässer ausgebaut und weisen kein natürliches Fliessregime mehr auf. Die Errichtung von Speicherkraftwerken verstärkt dieses unnatürliche Regime zusätzlich durch Schwall- und Sunkerscheinungen. Des Weiteren hat die Wasserkraftnutzung zu einem veränderten Feststoffregime geführt und den Temperaturhaushalt beeinflusst.

Nichtsdestotrotz bergen die Gewässer immer noch ein bedeutendes Nutzungspotenzial. Der wachsende Energiebedarf, das Verlangen nach erneuerbaren und CO_2-emissionsfreien Energieträgern sowie die gesellschaftliche Skepsis im Hinblick auf Kernenergie geben der Wasserkraftnutzung neuen Aufschwung, insbesondere in Kombination mit den neuen erneuerbaren Energien (Wind, Sonne). Parallel hierzu besteht ein grosses Interesse an der Revitalisierung von Fliessgewässern und aquatischen Biotopen.

Ohne Berücksichtigung des oben genannten Mehrzweckcharakters und Einbeziehung aller Interessensgruppen lassen sich wasserbauliche Projekte heute nicht mehr realisieren. Die sich daraus ergebende Komplexität erfordert zudem eine vernetzte Planung, was zwangsläufig zu komplizierteren Lösungsansätzen und Fra-

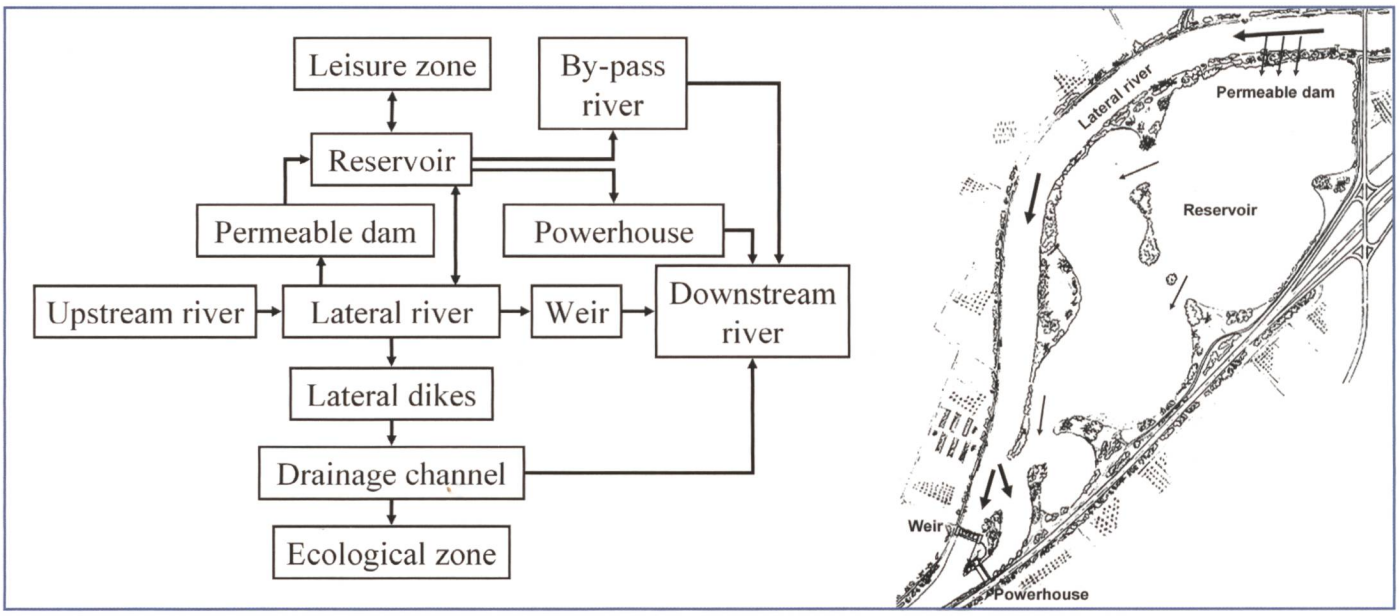

Bild 1. Links: Module eines Mehrzweckspeichers. Rechts: Konkretes Beispiel eines Mehrzweckspeichers [9].

gestellungen führt. Um einen vernünftigen und tragbaren Kompromiss zu erzielen, sind verschiedenste Methoden und Ansätze entwickelt worden [3].

Wegen der starken Interaktionseffekte müssen komplexe Systeme dieser Art zunächst mit einer qualitativen Analyse und anschliessend mit einer quantitativen Betrachtung angegangen werden [4]. Gemäss [5] ist unter einem dynamischen System «a complex system analysis method done by a causal analysis, followed by a dynamic transcription, completed by a model and processed with a computer simulation» zu verstehen. Eine qualitative Analyse kann mit einem ganzheitlichen vernetzten Ansatz durchgeführt werden [6].

1.2 Resultate der qualitativen Analyse

Um einen Überblick über die Komplexität des Projektes zu bekommen, ist zunächst eine qualitative Vorstudie durchgeführt worden [7]. Hierzu wurden die Einflussgrössen einer wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlage in drei thematische Gruppen unterteilt: Hydraulik, Energie, Finanzen, Sozioökonomie, Grundwasser und Ökologie. Die erste Gruppe umfasst die Variablen, welche die Grösse des Projektes bestimmen. Hier werden z.B. die Oberfläche des Speichers, die Dammhöhe und die Anordnung und Ausgestaltung des Projektes definiert. Die zweite Gruppe beschäftigt sich mit dem Betrieb und der Bewirtschaftung des Mehrzweckspeichers. Insbesondere geht es hier um die Kontrolle der unterwasserseitigen Fliessverhältnisse. Die dritte Gruppe enthält die Indikatoren oder Gradmesser, von denen die ökologische Verbesserung, die finanziellen Auswirkungen und der potenzielle Freizeitwert die wichtigsten darstellen. Mit der qualitativen Analyse können bereits die verschiedenen Nutzungsanforderungen verglichen werden. Das Gesamtmodell stützt sich dann auf die Resultate der qualitativen Analyse.

1.3 Quantitative Erwartungen und Pareto-Resultate

Ausgehend von Messdaten der Rhone oberhalb des Genfersees liefert das Gesamtmodell quantitative Ergebnisse für die Kosten, die Energieproduktion und deren Verteilung über das Jahr. Darüber hinaus werden Aussagen über die Abflussverringerung und deren ökologische Auswirkungen erhalten. Dabei wird sowohl der Speicher als auch der flussabwärts liegende Gewässerabschnitt betrachtet.

Die Resultate werden mittels des Pareto-Dominanz-Konzeptes ausgedrückt. Dieses Konzept ermöglicht die Generierung von Interessenslösungen ohne Wichtung [8].

Im vorliegenden Fall wird ein Laufwasserkraftwerk mit einem flachen Speicher im Seitenschluss zur Energiegewinnung und Schwall und Sunk Reduktion betrachtet. Ein Projekt dieser Art ist für die stark begradigte Rhone oberhalb des Genfersees denkbar [9] [10]. Aufgrund zahlreicher Speicherkraftwerke ist das Fliessregime der Rhone in diesem Bereich durch tägliche und saisonale Abflussschwankungen stark beeinträchtigt. Da das Einzugsgebiet durch mehrere Gletscher gekennzeichnet ist, spielt der Eintrag von Feinsedimenten (Gletschermilch) eine weitere Rolle. In *Bild 1* ist ein Mehrzweckspeicher modulartig und in situ beispielhaft dargestellt. Der vorliegende Beitrag legt in diesem Zusammenhang das Hauptaugenmerk auf die Wechselwirkung von Energieproduktion und Ökologie. Dabei werden sowohl der Speicher selbst als auch der unterstromige Flussabschnitt betrachtet.

2. Gesamtmodell

2.1 Algorithmus des Gesamtmodells

Die Ergebnisse der qualitativen Analyse unterstreichen die Notwendigkeit einer quantitativen Analyse. Diese Analyse hat die Betrachtung zahlreicher Aspekte (multi-purpose) sowie eine fundierte Ergebnisinterpretation zum Ziel (multi-criteria). Die quantitative Studie wird mit Hilfe des Queuing Multi-Objective Optimizer (QMOO) Algorithmuses durchgeführt (vgl. *Abschnitt 2.2*).

Die Variablen, welche sich auf die Grösse des Projektes beziehen müssen unabhängig von den Bewirtschaftungsvariablen sein. Bei einer Simulation in Stundenschritten ergibt sich über das Jahr eine Anzahl von 8760 Betriebsvariablen, welche dem stündlichen Abfluss aus dem Speicher über ein Jahr entsprechen. Wird diese Zahl zu den 20 grössenrelevanten Variablen addiert, so ergibt sich eine Zahl, die die Leistungsfähigkeit jedes Optimierungsverfahrens übersteigen würde. Folglich muss die Grössen- und Betriebsoptimierung auf zwei aufeinander folgende Schritte aufgeteilt werden (vgl. *Abschnitt 3*).

Der Algorithmus des Gesamtmodells startet mit einem beliebig gewählten Vektor für die internen Variablen (Projektgrösse und äussere Bewirtschaftungszwänge). Die externen Variablen beziehen sich auf nicht kontrollierbare Parameter wie Zuflussmenge und Zuflusstemperatur usw. Dieser Vektor hängt von der Lage und den Gegebenheiten des Projektgebietes ab.

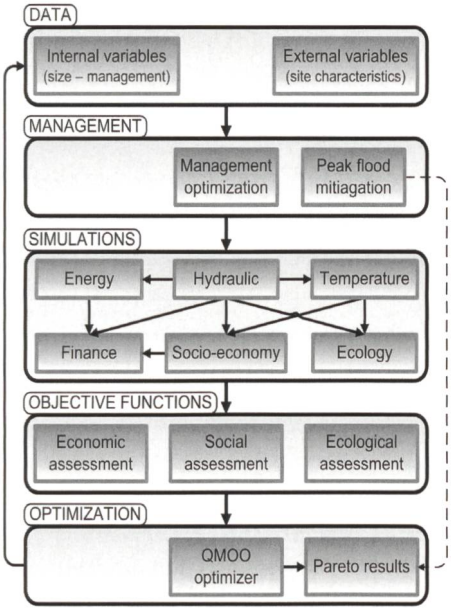

Bild 2. 5-schrittiger Gesamtalgorithmus.

In Abhängigkeit der internen und externen Daten erfolgt im zweiten Schritt die eigentliche Betriebsoptimierung. Da der Speicher für die Reduktion der Hochwasserspitze ausgelegt ist, ist zusätzlich ein Modul zur Hochwasseroptimierung implementiert.

Der 3. Schritt des Algorithmuses besteht aus verschiedenen Simulationswerkzeugen, von denen das erste die Hydraulik modelliert. Aufbauend auf den hydraulischen Ergebnissen wird die Wassertemperatur im Speicher und für den abgegebenen Durchfluss berechnet. Die gleichen Berechnungen werden für die Energieproduktion durchgeführt. Anschliessend werden die ökologischen, sozio-ökonomischen und Kostensimulationen durchgeführt. Diese verschiedenen Simulationswerkzeuge stellen den Mehrzweckansatz des Problems dar.

Im 4. Schritt werden die Simulationsresultate in Zielfunktionen gesammelt. Da sowohl der QMOO-Optimierer als auch die übliche dreidimensionale Darstellung in der Lage sind, drei unterschiedliche Zielsetzungen zu bearbeiten, müssen die simulierten Resultate auf drei Indikatoren reduziert werden. Energetische und wirtschaftliche Aspekte des Mehrzweckspeichers können in einem Kostenfaktor zusammengefasst werden. Da die sozialen und ökologischen Parameter unterschiedliche Masseinheiten besitzen, bilden sie die zwei weiteren Achsen.

Der 5. Schritt besteht aus dem Optimierungstool und liefert die Pareto-Lösungen. Hierzu ändert das Optimierungstool die internen Variablen. In *Bild 2* ist der 5-schrittige Algorithmus dargestellt.

2.2 Das Optimierungstool QMOO

Das Optimierungstool QMOO (Queuing Multi-Objective Optimizer) ist am Laboratory for Industrial Energy Systems der EPFL entwickelt worden [11]. Es läuft unter MatLab und basiert auf einem genetischen Algorithmus. Algorithmen dieser Art sind besonders gut für Optimierungsprobleme mit mehreren Zielfunktionen geeignet [12]. Da sie ebenfalls in der Lage sind, nicht-lineare, nicht-kontinuierliche, entkoppelte und multi-modale Probleme zu behandeln, eignen sie sich sehr gut für die Auflösung komplexer Probleme.

Das Optimierungstool erzeugt zuerst eine zufallsverteilte Population von Lösungen. Jedes Mitglied dieser Population stellt einen internen Variablenvektor dar. Für jeden Vektor wird vom Algorithmus die Güte des entsprechenden Zielfunktionsvektors berechnet. Das Optimierungstool verwendet dann die Güte der gegenwärtigen Population, um durch Mischung die nächste Population zu generieren. Der Optimierungsprozess wird beendet, wenn eine definierte Anzahl von Populationen erreicht ist oder die Güte optimal zu sein scheint. Um die Rechenzeit zu verringern und verschiedene lokale Optima gleichzeitig zu erzeugen, werden von QMOO Cluster gebildet, welche dann separat bearbeitet werden. Die Randregionen der Population werden dennoch konserviert, um die volle Bandbreite des Lösungsraumes zu nutzen.

Da nur die besten generierten Lösungen konserviert werden, wird die letztendlich die optimale Pareto-Lösung erhalten. Eine Pareto-Lösung wird als Lösung definiert, die mindestens eine Gütedimension verbessert ohne dabei irgendeine andere zu verschlechtern. Dieser Lösungsansatz ermöglicht die Generierung der besten physikalischen Lösung ohne jegliche Gewichtung. Auf diese Weise wird die politische Kompromisslösung klar von der wissenschaftlichen Konsenslösung entkoppelt.

3. Bewirtschaftungsoptimierung

3.1 Zielfunktion

Die Speicherbewirtschaftung basiert auf stündlichen Simulationsschritten für ein gesamtes Jahr und wird in ein System nichtlinearer Gleichungen umgewandelt. Das System wird im AMPL-Code [13] abgebildet und mit dem Cplex-Solver gelöst. Es wird mit einer sieben Tagesvorhersage für eine Gültigkeit von nur zwei Tagen berechnet. Das System besteht aus einer Zielfunktion, Variablen, Daten und Randbedingungen.

Die Zielfunktion maximiert für jede Stunde die Speicherzuflussrate gemäss Gl.

$$Max\left(\sum_t Accumulation(t)\right), t \in [1;168], t \in \mathrm{N} \quad (1)$$

Philippe Heller bei seinem Vortrag in Bellinzona, anlässlich der 95. Hauptversammlung 2006, des SWV (Foto MMi).

Entsprechend einer grösser werdenden Ableitung der Wasserstands-Volumen-Beziehung, minimiert diese Zielfunktion die Wasserspiegelschwankungen des Speichers für ein gewünschtes Speichervolumen. Für eine flussabwärts tolerierte Wasserspiegelschwankung (Schwall- und Sunk-Toleranz) wird der Hydropeaking-Effekt minimiert. Gleichzeitig maximiert die Funktion implizit die Energieproduktion (verfügbare Fallhöhe).

Die Variablen bestehen aus einem Vektor von 8760 Positionen, z.B. des stündlichen unterwasserseitigen Abflusses. Dieser Vektor legt die Bewirtschaftungslösung fest. Die Eingangsdatensatz besteht aus dem Ausgangsspeicherniveau und der Zuflussmenge. Entsprechend der geltenden Vorhersage besteht der oberwasserseitige Vektor aus 168 Werten.

Die Randbedingungen eines solchen Systems sind die gängigen physikalischen Grössen wie das maximale (Gl. 2) und minimale Speichervolumen (Gl. 3) sowie ein positiver Speicherabfluss (Gl. 4).

$$Storage(t) \leq \text{Volume_max}, \forall t \quad (2)$$

$$Storage(t) \geq 0, \forall t \quad (3)$$

$$Q_{downstream}(t) \geq 0, \forall t \quad (4)$$

Darüber hinaus sind auch zwei Betriebsparameter zur Reduktion von Schwall und Sunk enthalten. Der erste limitiert die unterstromige Wasserspiegelvariation (mathematisch gesehen die Ableitung des Wasserspiegels), der zweite eine maximale und minimale Variation um den mittleren Wasserspiegel. Typische Werte für diese zwei Begrenzungen sind 8 cm/h bei einer maximalen Abweichung vom Mittel von 30 cm. Diese Begrenzungen werden für Winter- und Sommermonate über unterschiedliche Werte definiert. Die Winter- und Sommermonate werden nach mittleren wöchentlichen Prognosen definiert. Für die

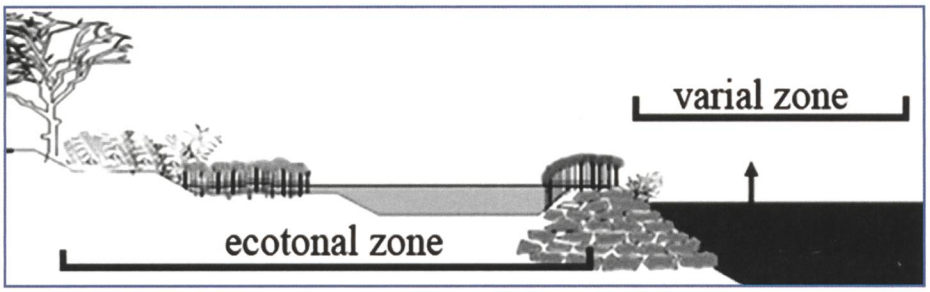

Bild 3. Schutz der Wasser-Land-Wechselzone des Mehrzweckspeichers durch einen überströmbaren Damm.

Übergangszeit im Frühling und im Herbst werden lineare Übergangswerte berechnet. Über diese vier Randbedingungen (zwei während der Winterzeit, zwei während der Sommerzeit) kann die Hauptzielsetzung der Speicherbewirtschaftung definiert werden, Hydropeaking-Effekte Richtung unterstrom zu reduzieren. Zwei zusätzliche Bedingungen (eine für den Winter, eine für den Sommer) begrenzen zudem die maximale Variation des Speicherniveaus. Die entsprechenden Werte bewegen sich zwischen 0,5 m (Sommer) und 4,5 m (Winter). Bei mathematisch unstetigen Systemen wird die unterstromige Randbedingung in 5% Schritten entschärft.

4. Ökologisches Modell

4.1 Systemübersicht

Das Mehrzwecksystem besteht aus (1) dem Speicher und (2) dem unterstromigen Flussabschnitt. (*Bild 1, rechts*). Die Gestaltung und der Betrieb des Speichers sind darauf ausgerichtet, das unterhalb liegende hydraulische System nachhaltig zu beeinflussen, d. h. ein lokal über einige Quadratkilometer angeordnetes System beeinflusst ein mehrere hunderten Quadratkilometer umfassendes Gebiet. Diese Massstabsunterschiede erfordern unterschiedliche Methoden, um eine ausreichende Berücksichtigung der ökologischen Prozesse in jedem der beiden unterschiedlich grossen Systeme zu gewährleisten. Einer der Gründe, warum Modelle entwickelt wurden, war die Vereinfachung komplexer Systeme zur leichteren Identifikation der Schlüsselvariablen. Die Folge dieses Kompromisses ist der Informationsverlust über sich abspielenden Prozesse mit verdeckten Einflüssen (z. B. Langzeitverhalten oder «Cocktail»-Effekt). Um die Gesamtheit der ökologischen Aspekte besser einfliessen lassen zu können, ist ein theoretisches ökologisches Modell des Speichers entwickelt worden. Es basiert auf vorhandenem Wissen bzgl. der ökologischen Prozesse und deren Einflussparameter sowie einem expertenbasierten Ansatz zur vollständigen Erfassung aller relevanten ökologischen Fragestellungen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das gegenwärtige Wissen über anthropogen geschaffene Gewässer und Kenntnisse aus dem Seebau bessere Resultate erbringen werden und weniger Gefahr bergen als die von einem Modell vorgeschlagenen Bemessungs- und Bewirtschaftungsrichtlinien. Für den unterhalb des Speichers liegenden Flussabschnitt (d.h. rhoneabwärts) erfordern der Massstab, die Prozessdauer und die Komplexität einen modellgestützten Ansatz, um die Ökologie in ihrer Gesamtheit zu erfassen.

4.2 Ökologische Betrachtungen des Mehrzeckspeichers

Die Aufgabe des Mehrzweckspeichers ist die Dämpfung rascher unterwasserseitiger Wasserspiegelschwankungen. Die Abflussänderungen werden durch Speicherretention reduziert, was beträchtliche Wasserspiegelschwankungen im Speicher zur Folge haben kann. Ein Ziel des Mehrzweckspeichers ist die ökologische Situation zu verbessern. Dies erfordert eine entsprechende Teiloberfläche, die ökologischen Zwecken zu Gute kommt. Diese Zonen sollten weitgehend vor anthropogenen Störungen geschützt werden. Die Wasser-Land-Wechselzone muss zudem vergrössert und weitgehend vom Einfluss der beträchtlichen und häufigen Wasserspiegelschwankungen entkoppelt werden. Dies kann mit einem überströmbaren Damm realisiert werden (*Bild 3*). Die periodische Füllung der flachen amphibischen Zone (< 0,5 m) erfolgt beim Einstau des Speichers. Bei fallendem Speicherspiegel wird das Wasser in der amphibischen Zone zurückgehalten. Auf diese Weise wird eine dauerhafte Benetzung sichergestellt. Mit der Zeit wird sich in diesem Bereich eine für diese Bedingungen typische Vegetation bilden, welche wiederum Lebensraum und Schutz für dort lebende Tiere bietet.

4.3 Verbindung zum Unterwasser

Die Durchgängigkeit von Wehr und Kraftwerk muss erhalten bleiben, um die Wanderungsaktivitäten von Fischen und Makroinvertebraten nicht zu beeinträchtigen. Hierzu stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung (*Bild 4*).

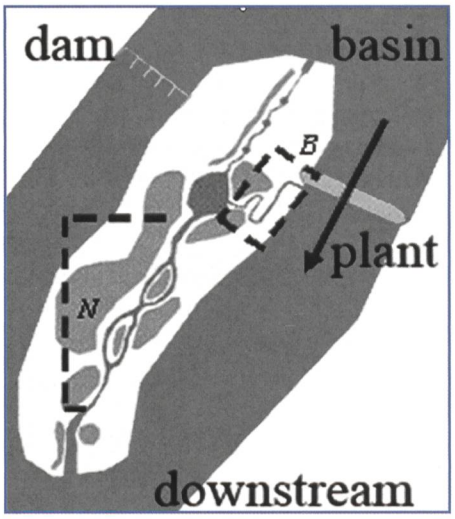

Bild 4. Möglichkeiten zur Gewährleistung einer Durchgängigkeit für Fische und Makroinvertebraten: N: Umgehungsgerinne mit Step-pool-Sequenzen, B Fischtreppe.

Ein Umgehungsgerinne ist einem Fischpass bzw. einer Fischtreppe vorzuziehen, da der Fischpass häufig artenselektiv wirkt und für Makroinvertebraten nicht immer zu überwinden ist. Die Besonderheit des in *Bild 4* gezeigten Aufstieges sind (1) das naturnahe Segment und (2) die Fischtreppe. Die naturnahe Aufstiegshilfe besteht aus einer Abfolge von Schnellen und Senken (Steppool), ist an den Ufern bewachsen und weist ein sehr mildes Gefälle auf. Die Fischtreppe bietet eine zweite Aufstiegsmöglichkeit, falls die Fische den Einstieg in das Umgehungsgerinne verpasst haben sollten und vor den Turbinenaustritten blockiert sein sollten. Die Fischtreppe spielt insofern eine wichtige Rolle, als dass Wanderverzögerungen eingeschränkt und somit der Reproduktionserfolg erhöht wird [14].

4.4 Ökologische Betrachtungen des unterstrom liegenden Flussabschnittes

Der flussabwärts liegende Gerinneabschnitt spielt eine wesentliche Rolle im Bewirtschaftungskonzept des Speichers. In der Literatur bzgl. Schwall und Sunk wird empfohlen, dass unter normalen Betriebsbedingungen die täglichen Wasserspiegelfluktuationen nicht mehr als +/- 30 Zentimeter betragen sollten. Zudem sollte eine Schwankungsbreite von 10 cm/h nicht überschritten werden [15] [16]. Ausserdem ist die Instandhaltung des Flussbettes während periodischer bettbildender Abflüsse durch den Speicher sicherzustellen [17] [18]. Die Gesamtheit aller ökologischen Aspekte des unterstromigen Flussabschnittes wird durch die drei Module (1) Zoobenthos, (2) Fischmodul und (3) Vegetation berücksichtigt.

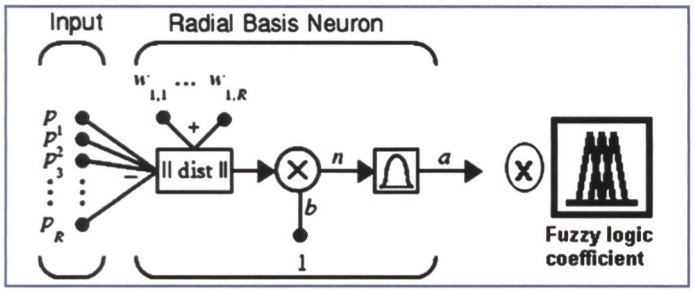

Bild 5. Schematische Darstellung des Zoobenthos-Moduls. Die Eingangsgrössen sind flussspezifische Taxabeobachtungen und physikalische Parameter. Die «radial basis neuron» liefert den PSRI-Wert, die Fuzzy Logik Koeffizient simuliert den Schwall- und Sunk-Effekt. Das Resultat ist eine flussabschnittsabhängige Prognose der Artenvielfalt.

Variables	Unit	Value
Reservoir surface	km^2	1
Dam elevation	m	8.68
Winter downstream water level speed variation	cm/h	8
Winter downstream water level variation	cm	30
Winter reservoir level variation	m	4.5
Summer downstream water level speed variation	cm/h	15
Summer downstream water level variation	cm	50
Summer reservoir level variation	m	0.8

Tabelle 1. Betriebsoptimierung der Haupteinflussgrössen.

4.4.1 Zoobenthos-Baustein

Dieses Modul prognostiziert den Zoobenthosartenreichtum in homogenen Flussabschnitten. Es basiert auf (1) flussspezifischen Artbeobachtungen (Taxa), (2) physikalischen Kenngrössen sowie (3) Schwall und Sunk Erscheinungen. Zur Berechnung eines vorläufigen standardisierten Artenreichtumindexes (Preliminary Standardized Richness Index, PSRI) werden Radial Basis Funktionen (RBF) [19] [20] [21] [22] verwendet. Der PSRI-Wert sagt den zu erwartenden Artenreichtum für einen bestimmten Flussabschnitt unter Berücksichtigung der gegebenen Hydropeaking-Effekte voraus. Mit Hilfe der Fuzzy-Logik wird ein Schwall- und Sunk-Koeffizient berechnet [23] [24] [25]. Die aktuelle Schwall und Sunk-Situation wird hierbei als Referenzsituation angesehen und zu Null gesetzt. Die Verknüpfung des PSRI-Wertes mit dem nach der Fuzzy-Logik bestimmten Schwall- und Sunk-Koeffizienten liefert die zu erwartende Zoobenthosartenvielfalt für den betrachteten Flussabschnitt (*Bild 5*).

4.4.2 Fisch-Modul

Das Fischmodul prognostiziert die Resultate eines Habitatmodells wie PHABSIM [26] [27] für vier Fischlebensräume. Es folgt dabei dem Ansatz nach [28]. Die Habitatindices jedes Fischlebensraumes werden anschliessend mittels unabhängiger Fuzzy-Koeffizienten angepasst, indem (1) Hydropeaking-Effekte und (2) thermische Änderungseffekte [15] simuliert werden. Die Ergebnisse sind fischartspezifische Lebensraumindices, welche mit der Flussabschnittsoberfläche multipliziert werden können und somit gewichtete verfügbare Oberflächen pro Fischgrupppe berechnen.

4.4.3 Vegetationsmodul

Das Vegetationsmodul wird zurzeit entwickelt. Es wird aus einem System von Differentialgleichungen bestehen, welche (1) die unter Wasser lebende Biomasse bestimmen und (2) einen Habitatindex für wechselfeuchte Pflanzen (Helophyten, z. B. Schilf und Binsen) berechnen [29].

4.4.4 Verknüpfung der einzelnen Module

In Abhängigkeit zielspezifischer ökologischer Zielsetzungen wird jedem Modul ein Gewicht zugeordnet. Auf diese Weise tragen die Entscheidungsverantwortlichen direkt zum Zusammenbau der einzelnen Teilmodule bei. Ihnen steht somit ein wissenschaftlich fundiertes Simulationswerkzeug zur Verfügung, welches die Planung und den Betrieb des Speichers mit ökologischen Konsequenzen, die sich unterhalb der Anlage ergeben, verbindet.

5. Fallbeispiel obere Rhone in der Schweiz

5.1 Gegenwärtiger Zustand

Die Errichtung grosser Talsperren während der letzten 50 Jahre führte im Fall der oberen Rhone zu ausgeprägten täglichen Schwall- und Sunk-Erscheinungen. Der ursprüngliche Winterabfluss der Rhone war mit einem mittleren Abfluss von etwa 50 m^3/s verhältnismässig konstant. Heutzutage schwankt der Abfluss zwischen 35 m^3/s am Wochenende und mehr als 160 m^3/s unter der Woche. Dieses bedeutet eine tägliche Wasserspiegeländerung von mehr als 1 m in weniger als einer Stunde. Zusätzlich zum Schwall und Sunk führt der Kraftwerksbetrieb auch zu einem Wärmetransfer zwischen der Sommer- und Wintersaison. Infolgedessen ist das Wasser im Winter ungefähr ein Grad

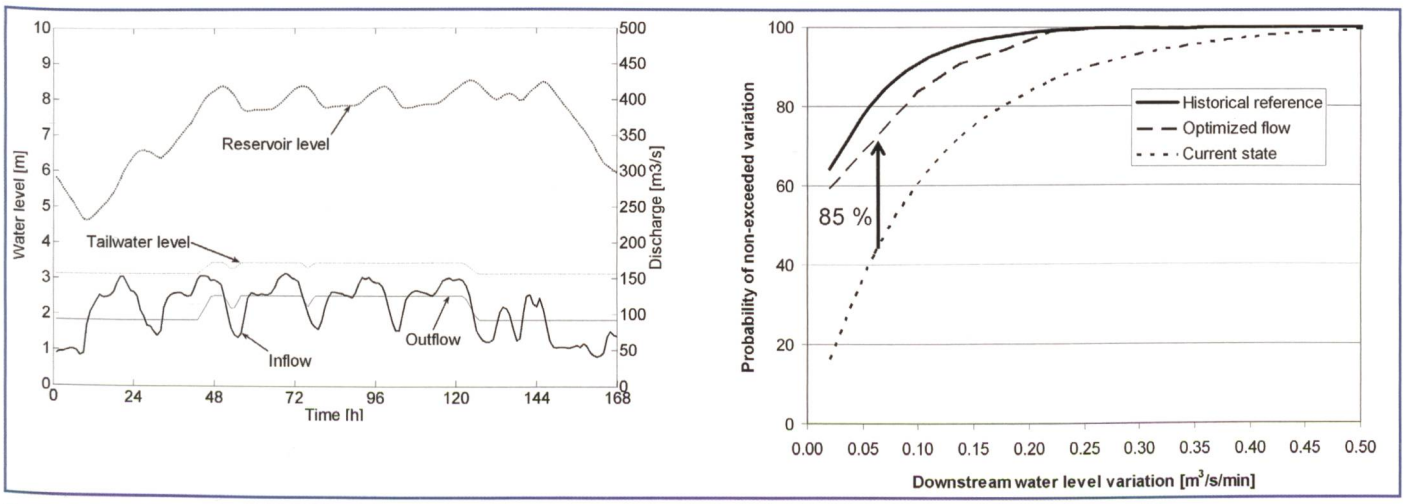

Bild 6. Links: Charakteristische Winterwoche mit Schwallreduktion flussabwärts. Rechts: Schwall- und Sunk-Indikator und Verbesserung des Abflussregimes (optimized flow).

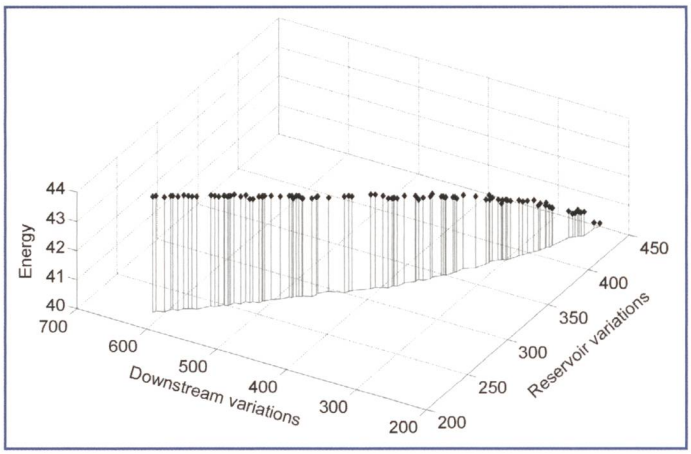

Bild 7. Pareto-Optimierung für die Energieproduktion (GWh/Jahr), unterstromige Wasserspiegelschwankungen (m^3/s/min/Jahr) und Speichervariation (m/Jahr).

	Actual	R3	R3 + Basin
Discharge	Branson 2002	Branson 2002	from hydraulic model
Bed width	Actual (50 m)	x 1.5 (75 m)	x 1.5 (75 m)
Bank slopes	Actual (1:2.2 / 1:2.5)	Smooth (1:6)	Smooth (1:6)
Granulometry	d50*=0.1 m	d50=0.07 m	d50=0.07 m
Water temperatures	Branson 2002	Branson 2002	from thermal model

Bild 8. Charakteristika der drei Szenarien. Branson bedeutet: Die Abflusswerte stammen von der Messstation Branson.

wärmer und im Sommer ein Grad kälter als dies vor dem Bau der Wasserkraftanlagen der Fall war.

Diese drei oben genannten Veränderungen (Flusslandschaft, Schwall und Sunk, Wärmehaushalt) haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Ökologie, die sich zum jetzigen Zeitpunkt in einem sehr verbesserungswürdigem Zustand befindet.

5.2 Reduzierung der Schwall- und Sunk-Erscheinungen

Das Hauptziel eines Mehrzweckspeichers ist die Dämpfung der künstlich hervorgerufenen Schwall- und Sunk-Effekte. Eine Betriebsoptimierung der in *Tabelle 1* aufgeführten Maximalwerte für das Jahr 2003 hätte eine bedeutende Verbesserung des unterwasserseitigen Fliessregimes zur Folge (*Bild 6, links*).

Die unterstromige Fliessregime kann mittels eines Schwall- und Sunk-Indikators treffend beschrieben werden. Der Indikator basiert auf einer jährlichen kumulativen Abflussänderungskurve. Die Abflussänderung (x-Achse) wird in m^3/s/min ausgedrückt. Auf der vertikalen Achse ist die Wahrscheinlichkeit des Nicht-Überschreitens einer bestimmten Abflussschwankung aufgetragen. Da die Abflussvariation als ein Hauptstressfaktor auf das Ökosystem angesehen wird, gibt dieser Indikator die anthropogen verursachten Einflüsse und Effekte auf das hydraulische Regime wieder. Die gegenwärtige Lage kann nun mit einem historischen Zustand verglichen werden. Mit dem Indikator kann ebenfalls der Einfluss bzw. die Verbesserung des hydraulischen Regimes durch den Mehrzweckspeichers erfasst werden. Die Fläche zwischen den Kurven summiert diese Verbesserungen auf und gibt sie in einem einzigen Wert wieder (vgl. *Bild 6, rechts*). Der Indikator zeigt eine Schwallreduktion von bis zu 85% an. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass ein solcher Mehrzweckspeicher ein nahezu natürliches Fliessregime ermöglicht.

5.3 Energieerzeugung

Für Mehrzweckspeicher dieser Art ist die Energieproduktion nicht als oberstes Ziel anzusehen. Die tatsächlich gewonnene Energie wird immer mit der physikalisch maximal möglichen Energieproduktion eines traditionellen Laufwasserkraftwerkes, d.h. Betrieb mit konstantem Stauspiegel, verglichen. Wird die über das Jahr produzierte Energiemenge für einen optimierten Betrieb des Mehrzweckspeichers aufaddiert, so lässt sich feststellen, dass etwa 90% der maximal möglichen Energie eines klassischen Kraftwerks erzeugt werden. Dieser Verlust von 10% ist hauptsächlich auf die sehr geringen Wasserstände während eines Winterwochenendes (*Bild 6, links*) zurückzuführen. Zur Einhaltung der Grenzen der maximalen Abflussschwankungen eignen sich Niedrigwasserabflüsse besonders gut. Es erfordert dann mehr als einen Tag, um den Speicher wieder zu füllen. Während der Sommermonate mit naturgemäss grösseren Schwankungen kann das maximale Stauziel des Speichers nahezu dauerhaft (Veränderung von 20 bis 30 Zentimetern) gehalten werden.

5.4 Pareto-Ergebnisse

Die zwei vorhergehenden Resultate (Schwall und Sunk sowie Energie) können mit einer Pareto-Kurve zusammengefasst werden. Die gute Form der auf den Berechnungen basierenden Kurve unterstreicht die a priori-Wahl einer Paretodarstellung.

Bild 7 veranschaulicht die Relationen zwischen der Speichervariation (ausgedrückt in m/Jahr), der unterstromigen Wasserspiegeländerung (in m^3/s/min/Jahr) und der Energieproduktion (in GWh/Jahr). Darüber hinaus wird die kontinuierlich fallende Beziehung zwischen Energieproduktion und Speicherstand unterstrichen. Diese Tatsache deckt sich mit der Beziehung zwischen Fallhöhe und Leistung (Gl. 5).

$$P = \rho * g * h * Q \qquad (5)$$

mit ρ = Dichte des Wassers, g = Erdbeschleunigung, h = Fallhöhe und Q = Durchfluss.

In der gleichen Abbildung ist in der x-y-Ebene eine ebenfalls kontinuierlich fallende Beziehung zwischen dem Speicher und dem Unterwasser zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung werden die offensichtlich gegeneinander wirkenden Effekte eines konstanten Speicherniveaus und einer Revitalisierung des Unterwassers sichtbar.

Da die Optimierung auf zwei zusammenhängenden Gleichungen beruht, stellt sie relative zusammenhängende Resultate dar.

Die Verbindungen zwischen Hydraulik und Ökologie wird im folgenden Abschnitt behandelt. Da die hydraulischen Verbesserungen in direktem Zusammenhang mit den finanziellen Auswirkungen stehen, ist es möglich, dass sie weniger zusammenhängende Resultate erzielen.

5.5 Verbesserungen der aquatischen Ökologie

Im Rahmen der Fallstudie «obere Rhone» sind drei Szenarien für die numerische Anwendung des Zoobenthos- und des Fischmoduls durchgespielt worden: (1) obere Rhone in ihrer heutigen Konfiguration («Actual»), (2) hypothetische Konfiguration nach der 3. Rhonekorrektur («R3») [30] und (3) hypothetische Konfiguration R3 mit Mehrzweckspeicher («R3+Basin») (*Bild 8*).

Das niedrigste Zoobenthosartenreichtum (*Bild 9*) wurde für die heutige Konfiguration des Flusses vorausgesagt

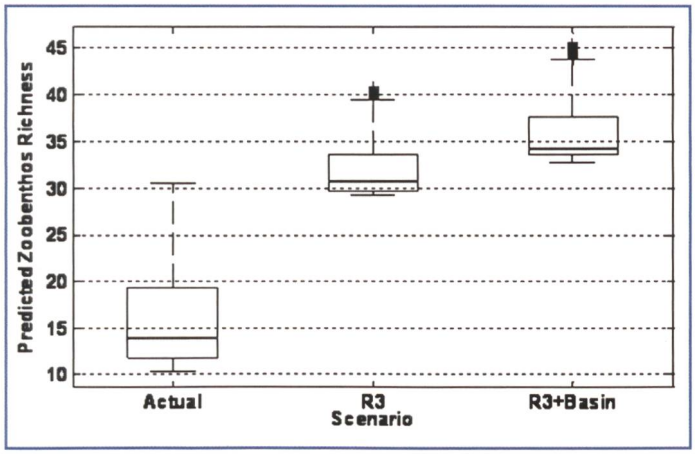

Bild 9. Zoobenthosprognose für die drei Szenarien.

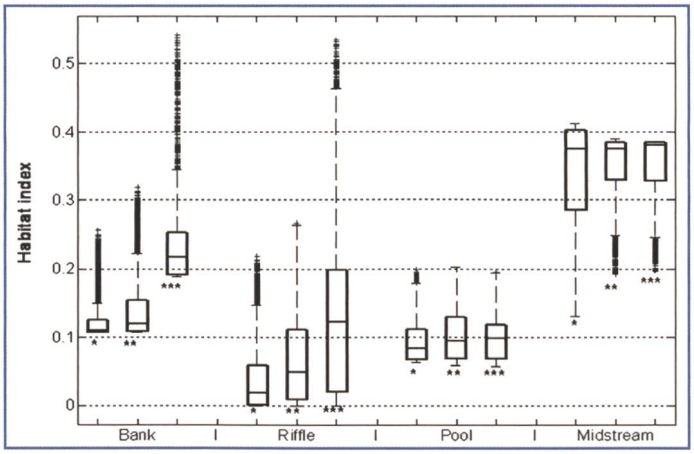

Bild 10. Prognostizierter Habitatindex für die jeweilige Fischgruppe – Uferbereich (Bank) – Strömungsliebend (Riffle) – Tiefwasserbereich (Pool) – freier Wasserkörper (Midstream) – in Abhängigkeit des Szenarios (Actual (*), R3 (**) und R3+Basin (***).

und nimmt für die Konfigurationen R3 und R3+Basin-zu. Die prognostizierte Artenvielfalt (Taxa) liegt vermutlich in der lokalen Aufweitung begründet, welche eine Abnahme der Fliessgeschwindigkeit und -tiefe nach sich zieht. Die weitere Zunahme der Artenvielfalt von Szenario R3 auf R3+Basin-spiegelt die Dämpfungseffekte des Speichers in Bezug auf Schwall und Sunk wieder.

Uferspezifische sowie rheophile Arten scheinen am meisten vom Übergang des aktuellen Zustandes zu den Szenarien R3 und R3+Basin zu profitieren (*Bild 10*). Die Arten der tiefen Wasserzonen sowie des freien Wasserkörpers hingegen scheinen durch eine Reduktion des Hydropeaking-Effektes weniger begünstigt zu sein. Dies liegt womöglich daran, dass Flachwasserzonen sowie Stromschnellen von schwankenden Wasserständen zuerst betroffen sind und folglich am meisten von verringerten Schwall- und Sunk-Effekten profitieren.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Zum Verständnis der Komplexität eines Mehrzweckspeichers ist ein qualitativer Ansatz erforderlich. Qualitative Resultate ermöglichen die Definition von Entwurfs- und Betriebsrichtlinien zur Erstellung eines quantitativen Modells. Der Zweck des hier dargestellten Modells besteht darin, die wissenschaftlichen Grundlagen für eine optimierte Mehrzweckanlage hinsichtlich Planung und Betrieb zu erarbeiten. Hierzu ist es erforderlich, soziale, ökonomische und ökologische Aspekte zu integrieren. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Faktoren Hydraulik, Energieproduktion und Ökologie.

Bei der Entwicklung eines ganzheitlichen Modellalgorithmuses (Evolutionsalgorithmus) (*Bild 2*) wird klar zwischen einer Optimierung der Auslegung und der Bewirtschaftungsoptimierung unterschieden. Der genetische Algorithmus basiert auf einem nicht-linearen Ansatz. Somit können die Resultate (*Bild 7*) in wissenschaftliche (Erzeugung von Pareto-Lösungen) und in politische Aspekte (Bewertung gewichteter Kriterien und Wahl einer Lösung) aufgeschlüsselt werden. Die vorgestellten Simulationsergebnisse beschreiben die jeweiligen Verbesserungen für die Rhone in quantitativer Hinsicht.

Das hydraulische Modell zeigt die generelle Verbesserung des unterwasserseitigen Fliessregimes auf. Im Optimalfall kann von einem naturnahen Regime ausgegangen werden. Das energetische Modell zeigt, dass ein tolerierbarer Energieverlust (etwa 10% der theoretisch maximalen Energieproduktion) zur Herstellung eines nahezu vollständig natürlichen hydraulischen Regimes in Kauf genommen werden muss. Die Zoobenthos- und Fischmodule (ökologisches Modell) veranschaulichen den ökologischen Gewinn durch die Verbesserung des hydraulischen Regimes (*Bild 9* und *10*). Obwohl diese beiden Module lediglich die ersten Schritte in Richtung eines vollständigen ökologischen Simulationsmodells darstellen, zeigen sie bereits vielversprechende Resultate. Bevor das Modell in der Praxis angewandt werden kann, sind noch gewisse Abstimmungs- und Verbesserungsarbeiten der implementierten Module erforderlich. Trotz diverser Feinarbeiten ist durch die Integration der einzelnen Module in ein Gesamtmodell der Rahmen für einen neuen innovativen Ansatz erbracht worden.

Danksagung

Die Übersetzung des Beitrages erfolgte durch Burkhard Rosier, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH).

Literatur

[1] *Meile, T., Schleiss A.J. & Boillat, J.-L.* 2005. Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. «Wasser Energie Luft – eau énergie air», 97, Heft 5/6: 133–142.

[2] *Meier, W.* 2002. Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. PhD Thesis, ETHZ Nr. 14526, Ökostrom Publikation Band 11, Zürich, Schweiz.

[3] *Leach, W.D. & Pelkey, N.W.* 2001. Making Watershed Partnerships Work: A Review of the Empirical Literature. J. Water Resour. Plng. Mgmt., 127: 378–385.

[4] *Coyle, G.* 2000. Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions. System Dynamics Review, 16: 225–244.

[5] EuroDicauTom, A Glossary of Space Terms, ESA 1982, http://europa.eu.int/eurodicautom/Controller.

[6] *Gomez, P. & Probst, G.* 1995. Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens. Bern, Schweiz: Paul Haupt Verlag.

[7] *Heller, P., Bollaert, E. & Schleiss, A.* 2005. Potential Synergies of Multipurpose Run-off-River Hydroelectric Powerplants. Proc. of Int. Conf. 31th IAHR Congress: 2121-2130. Seoul, Korea.

[8] *Goldberg, D.E.* 1989. Genetic algorithms in search, optmization and machine learning. Addison-Wesley, Reading Mass.

[9] *Bollaert, E., Irniger, P. & Schleiss, A.J.* 2000. Management of sedimentation in a multipurpose reservoir in a run-of-river powerplant project on an alpine river. Proc. of Int. Conf. Hydro 2000: 183–192. Bern, Schweiz.

[10] *Schleiss , A.* 2006. Möglische Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte, «Wasser Energie Luft» 1: 3–9.

[11] *Leyland, G.* 2002. Multi-objective optimisa-

tion applied to industrial energy problems. PhD Thesis, EPFL Nr. 2572, Lausanne, Schweiz.
[12] *Prasad, T. & Park, N.S.* 2004. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. J. Water Resour. Plng. Mgmt. 130(1): 73–82.
[13] *Fourer, R., Gay, D.M.* & *Kernighan, B.W.* 2003. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming. Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company.
[14] *Amoros, C. & Petts, G.E.* 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Paris.
[15] *Valentin, S.* 1995. Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques: effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivière. Laboratoire Hydroécologie Quantitative – Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques – CEMAGREF. Lyon, Université Claude Bernard – Lyon I: 263 pages.
[16] *Poff, N.L., Allan, J.D.* et al. 1997. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. Bioscience 47(11): 769–784.
[17] *Richter, B.D.* & *Richter, H.E.* 2000. Prescribing Flood Regimes to Sustain Riparian Ecosystems along Meandering Rivers. Conservation Biology 14(5).
[18] *Murle, U., Ortlepp, J.* & al. 2003. Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: The River Spöl, Swiss National Park. Aquatic Sciences 65(3): 191–198.
[19] *Dowla, F.U.* & *Rogers, L.L.* 1995. Solving Problems in Environmental Engineering and Geosciences with Artificial Neural Networks, The MIT press.
[20] *Lek, S.* & *Guégan, J.F.* 1999. Artificial Neural Networks as a tool in ecological modeling, an introduction. Ecol. Model. 90, 39–52.
[21] *Obach, M., Wagner, R.* & al. 2001. Modelling population dynamics of aquatic insects with artificial neural networks. Ecological Modelling 146: 207–217.
[22] *Zhang, L., Gove, J.H.* & al. 2005. Spatial residual analysis of six modeling techniques. Ecological Modelling 186: 154–177.
[23] *Zadeh, L.A.* 1995. Foreword. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide ver.2. I. The MathWorks. Natick, MA.
[24] *Silvert, W.* 2000. Fuzzy indices of environmental conditions. Ecological Modelling 130: 111–119.
[25] *Adriaenssens, V., DeBaets, B.* et al. 2004. Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management. The Science of the Total Environment 319: 1–12.
[26] *Bovee, K.D.* 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Increemental Methodology. USFWS/OBS, Fort Collins, CO.
[27] *Ginot, V.* 1998. Logiciel EVHA. EValuation de l'HAbitat physique des poissons en rivière, Ver. 2. Cemagref BEA/LHQ.
[28] *Lamouroux, N.,* & *Souchon, Y.* 2002. Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. Freshwater Biology 47:1531–1542.
[29] *Wade, A., Hornberger, G.M.* et al. 2001. On modeling the mechanisms that control in-stream phosphorous, macrophyte, and epiphyte dynamics: an assessment of a new model using general sensitivity analysis. Water Ressources Research 37(11): 2777–2792.
[30] Canton du Valais. 2006: http://www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=806.

Adresse des auteurs
Philippe Heller
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland
Anton Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland
Erik Bollaert 1
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland
Marc Pellaud
Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (GECOS), Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland
Rodolphe Schlaepfer
Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (GECOS), Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland.