

# Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen

Abhandlung

zur Erlangung des Titels

**Doktor der Naturwissenschaften**

der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von

Werner K. Meier

Dipl. Natw. ETHZ

geboren am 29.3.1971

von Ruswil LU

angenommen auf Antrag von

PD Dr. Peter Reichert, Referent

Prof. Dr. Hans-Erwin Minor, Korreferent

Prof. Dr. Bernhard Wehrli, Korreferent

Zürich, 2002

## Zusammenfassung

- Umweltfreundliche Wasserkraft?** Die Wasserkraft ist eine erneuerbare Energiequelle. Bei den betroffenen Fließgewässern führt diese Art der Stromproduktion jedoch zu ökologischen Beeinträchtigungen. Ein Beispiel sind Wasserentnahmen, welche zu Bachabschnitten mit stark reduzierten Abflussmengen führen. Auf diesen sogenannten Restwasserstrecken werden die Lebensbedingungen für Gewässerorganismen, wie zum Beispiel Wassertiefen, Strömungsverhältnisse oder Wassertemperaturen verändert. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der natürlichen Lebensgemeinschaften führen.
- Projektidee Ökostrom** Mit der Einführung eines Labels für „grünen Strom“ könnte die Situation einiger Gewässerökosysteme verbessert werden. Die Kriterien, welche für die Verleihung des Zertifikats erfüllt werden müssen, garantieren eine umweltfreundliche Produktion von Strom. Wasserkraftwerksgesellschaften, welche die Kriterien erfüllen, können ihre Kraftwerksanlagen zertifizieren lassen und damit einen Wettbewerbsvorteil erlangen. Eine unabhängige Kontrollinstanz überprüft regelmässig die Einhaltung der Auflagen sowie die Menge des produzierten und verkauften Ökostromes. Umweltbewusste KonsumentInnen kaufen den Ökostrom der zertifizierten Kraftwerke zu einem höheren Preis und ermöglichen dadurch die ökologischen Verbesserungen.
- Projektziel** Im Projekt „Ökostrom“ der EAWAG wurden wissenschaftlich fundierte Kriterien für umweltfreundliche Wasserkraftwerke entwickelt („greenhydro“-Verfahren). Dazu wurde im Bleniotal im Kanton Tessin bei den Anlagen der Kraftwerksgesellschaft OFIBLE eine umfangreiche Fallstudie durchgeführt. Neben Untersuchungen der Fließgewässerorganismen, des Schwebstoff- und Geschiebehaushalts, der chemischen Belastung, der Auen und des Grundwasserhaushaltes wurden auch Modellstudien durchgeführt. Das Ziel des vorliegenden Projekts bestand darin, erweiterte eindimensionale Modelle für die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bergbächen wie Abfluss, mittlere Fließgeschwindigkeit, Wassertemperatur und gelöste Stoffe zu entwickeln und für einige Bäche im Bleniotal zu eichen. Mit diesen Modellen können die Auswirkungen von Wasserentnahmen auf die oben erwähnten Variablen analysiert und das Verhalten bei möglichen Verbesserungsmaßnahmen prognostiziert werden.
- Hydraulikmodell** Mit dem hydraulischen Basismodell wird der Abfluss, die mittlere Fließgeschwindigkeit, die mittlere Tiefe und Breite sowie der Transport gelöster Stoffe simuliert. Das grosse Gefälle und die komplizierte Gerinnemorphologie machen einige starke Vereinfachungen nötig. Die Gerinnegeometrie ist in Fließrichtung und über den Querschnitt stark variabel. Für die Modellierung längerer Fließstrecken werden das Gefälle, die Geometrie des

Gerinnebetts und die Korngrößen sinnvollerweise über längere, einheitliche Bachabschnitte gemittelt. Die in Bächen häufig vorkommenden Pools (Kolke) haben einen grossen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit und die Längsdispersion (Mischung in Fliessrichtung). Der Austausch der Stoffe zwischen den Pools mit kleinen Fliessgeschwindigkeiten und den Zonen mit starker Strömung führt zu einer Reduktion der mittleren Transportgeschwindigkeit und einer Vergrößerung der Längsmischung im Vergleich zu einer Situation ohne Pools. Im Modell werden diese unregelmässig verteilten Pools unterschiedlicher Grösse durch sogenannte Totzonen ohne Wasserfluss mit konstanter Querschnittsfläche beschrieben. Das strömende Wasser im advektiven Kompartiment steht mit dem stillstehenden Wasser der Totzone über einen Austauschprozess in Verbindung.

**Transport-Reaktions-Modell** Wenn das Hydraulikmodell mit einem Term für Reaktionen erweitert wird, können mit diesem Modell zusätzlich der Transport und die Reaktionen von gelösten Substanzen simuliert werden.

**Wärme-transport-modell** Das Transport-Reaktions-Modell kann mit einem Wärmehaushaltsmodell erweitert werden. Mit diesem Wärmetransportmodell können die Wassertemperaturen von längeren Bachabschnitten simuliert werden. Es wurde ein Wärmehaushaltsmodell für Bergbäche zusammengestellt, welches alle relevanten Energieflüsse in Bergbächen berücksichtigt: Kurzweilige Sonneneinstrahlung, langweilige Ein- und Ausstrahlung, Wärmeaustausch mit dem Sediment, Reibungswärme, Verdunstung, Konvektion (Wärmeleitung an der Wasseroberfläche). Für das Modell sind Messwerte der Wassertemperaturen und meteorologischer Parameter als Randbedingung, Eich- und Validierungsgrößen notwendig.

**Messkampagnen im Bleniotal** Bei verschiedenen Abflüssen wurden in verschiedenen Strecken Tracerversuche mit Salz und Uranin durchgeführt. An diesen Stellen wurden auch Korngrößenanalysen gemacht. Es wurden Dotationsversuche durchgeführt, bei denen das Wasserkraftwerk bei zwei Wasserfassungen mehrere vorgängig festgelegte Wassermengen dotiert hat. In der Strecke unterhalb der Wasserfassung wurde die Fliessgeschwindigkeit, die Strömungsverhältnisse an der Gewässersohle, die benetzte Breite und die Wassertiefe gemessen. Der Bachabschnitt unterhalb der Kläranlage Olivone wurde chemisch beprobt. Die Wassertemperatur wurde an 35 Stellen im Bleniotal während zweier Jahre gemessen. Mit drei Meteostationen wurden meteorologische Parameter aufgezeichnet. Zusätzlich wurden auch Sedimenttemperaturen gemessen, um den Wärmeaustausch mit dem Sediment zu untersuchen.

**Resultate: 1. Implementierte Modelle** Die obenerwähnten Modelle wurden im Computerprogramm AQUASIM implementiert. Diese Modelle stehen also für andere Anwendungen zur Verfügung. Mit den Messwerten wurden die Modelle für Bergbäche im Bleniotal geeicht und validiert. In den

untersuchten Strecken können der Abfluss, mittlere Transportgeschwindigkeiten, Stoffkonzentrationen und Wassertemperaturen simuliert werden.

2. Bestimmung der hydraulischen Parameter Die Querschnittsfläche der Totzone und der Austauschkoefizient können wegen der grossen Variationen in der Gerinnegeometrie nicht direkt gemessen werden und müssen durch Parameterschätzungen aus Tracerversuchen bestimmt werden. Es gibt eine grosse Variation der Totzonenparameter von Bach zu Bach. Da die Totzonenparameter nicht stark vom Abfluss abhängen, kann mit einem Tracerversuch die Unsicherheit der Parameter schon sehr stark verringert werden. Damit keine Probleme bei der Identifikation der hydraulischen Parameter auftreten, muss der Reibungskoeffizient der Gerinnesohle mit einer empirischen Schätzformel aus dem Gefälle und der Korngrössenverteilung bestimmt werden. Mit dem Hydraulikmodell und den gemessenen Zuflüssen kann der Abfluss und die mittlere Fliessgeschwindigkeit für verschiedene Restwasserszenarios berechnet werden.
3. Szenarioanalyse Abwasser-einleitung Ein einfaches Wasserqualitätsmodell wurde auf einer 2.5 km langen Strecke unterhalb der Einleitstelle der neuen Kläranlage von Olivone getestet. Es wurden chemische Probenahmen ausgewertet und Tracerversuche bei verschiedenen Abflusssituationen durchgeführt. Die mit dem Modell berechnete Eliminationsrate von Phosphat auf der untersuchten Fliessstrecke beträgt  $0.54 \text{ h}^{-1}$  bei einem Abbau erster Ordnung. Zusätzlich wurde eine hypothetische Trockenwettersituation ohne Dotationen und eine hypothetische Situation ohne Wasserentnahme simuliert. Unter der Annahme, dass sich die Eliminationsrate nicht wesentlich verändert, konnte mit dem Modell gezeigt werden, dass bei der hypothetischen Situation ohne Wasserentnahme die Konzentration viel stärker verdünnt würden und die Aufenthaltszeiten durch die grössere Transportgeschwindigkeit kürzer wären. Bei einer hypothetischen Trockenwettersituation ohne Dotationen würde die Konzentration viel höher ausfallen und die gelösten Stoffe würden langsamer transportiert werden. Die Grenzwerte würden gemäss den Modellresultaten jedoch auch bei der Trockenwettersituation mit den gegebenen Einleitkonzentrationen nicht überschritten.
4. Keine Temperaturänderung bei steilen Strecken Bei steilen, beschatteten Bachabschnitten ist die Reibungswärme die dominierende Energiequelle. Das Wasser erwärmt sich (unabhängig von der Abflussmenge) um  $0.24^\circ\text{C}$  pro 100 m Höhendistanz. Eine Wasserentnahme führt deshalb auf diesen Strecken nur zu einer kleinen Änderung der Wassertemperatur. Die Wasserkraftnutzung hat bei den steilen Zuflüssen des Brenno (mit Ausnahme von extremen Restwassersituationen und Reservoirspülungen) keine signifikanten negativen Auswirkungen auf die Wassertemperatur. Dieses Resultat kann auch auf andere Bergbäche übertragen werden.

5. Einfluss auf Temperatur von flachen Strecken Bei Abschnitten mit kleinerem Gefälle werden die Strahlungsflüsse über die Wasseroberfläche und der Wärmeaustausch mit dem Sediment dominant. Falls durch Wasserentnahmen weniger Wasser im Bachbett verbleibt, wird dieses durch die Energieflüsse aus der Atmosphäre und dem Sediment stärker beeinflusst, da die Wasseroberfläche bei sinkendem Wasserspiegel nur wenig abnimmt. Zusätzlich ist das Wasser durch die grössere Aufenthaltszeit länger den Energieflüssen ausgesetzt. Modellresultate einer Situation im Frühsommer mit starker Einstrahlung zeigen am Ende einer 20.6 km langen Untersuchungsstrecke eine maximale Erhöhung der Wassertemperatur um  $3.7 (\pm 0.9)^\circ\text{C}$  durch Wasserentnahmen. Das Qualitätsziel in der Verordnung über Abwassereinleitungen, welches für Kühl- und Abwassereinleitungen gilt, fordert eine maximale Erwärmung von  $3^\circ\text{C}$  nach vollständiger Durchmischung. Gemäss dem Modell wird die Wassertemperatur bei einer Kaltwetterperiode im Winter durch Wasserentnahmen um  $1.8 (\pm 0.8)^\circ\text{C}$  erniedrigt. Bei tiefen Wassertemperaturen knapp überhalb  $0^\circ\text{C}$  besteht die Gefahr, dass sich durch die zusätzliche Auskühlung Eis bildet, welches bei natürlichen Verhältnissen nicht vorkommen würde.
- Übertragbarkeit Die vorgestellten Modelle können auch für andere Bergbäche verwendet werden. Als Voraussetzung müssen die Modelle jedoch mit Messwerten aus dem untersuchten System geeicht und validiert werden. Das Transport und Reaktionsmodell und das Wärmetransportmodell können bei der Untersuchung der Auswirkungen von Verbesserungsmassnahmen bei Ökostrom-Zertifizierungen eingesetzt werden. So können zum Beispiel die Restwassermengen berechnet werden, die nötig sind, damit eine Abwassereinleitung genügend verdünnt wird oder damit die Wassertemperatur gewisse Grenzwerte nicht unter- oder überschreitet.

## Summary

- Ecological hydropower?** Hydroelectric power generation uses a renewable source to produce electric energy. However, diversion of water from mountain streams decreases discharge in the stream section below the water intake. This is associated with changes in water depth, surface width, flow conditions and water temperature. These changes can have negative impacts on organisms in these stream sections.
- Green hydropower!** The situation of such mountain streams could be improved with the introduction of minimum flow requirements, which guarantee that negative impacts of water diversion are diminished. Because this cannot be done within a short time, certification of hydropower plants which fulfil such ecological requirements could be an alternative. Hydropower plants certified for producing "green hydropower" could sell their "eco-electricity" at a higher rate to environmentally aware consumers who are willing to pay the higher price. In Switzerland, such a label for "green hydropower" called "naturemade-star" has been introduced. Certification is carried out by an organisation independent of the hydropower companies (Verein für umweltfreundliche Energie, VUE).
- Project "Oekostrom"** The criteria for "green hydropower" used for this label were developed in the project "Oekostrom" at the Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG). An extensive case study was conducted for the hydropower plants of the company "OFIBLE" in the valley Blenio in the southern Swiss Alps. Besides observations of water organisms, suspended matter and sediment load, chemical substances, and groundwater levels, model studies were conducted. Models help to analyse the effect of water diversion and to predict the effects of options for improvement. One-dimensional models with dead zones were used to calculate discharge and flow velocity, transport and transformation of chemical substances, as well as water temperature of mountain streams in the Blenio valley.
- Hydraulic base model** The hydraulic model for discharge, flow velocity, and transport of dissolved substances serves as a base model for other models. The large slope and the complicated geometry of mountain streams lead to problems with modelling. This can only be solved with strong simplifications. The slope and the width of the stream-bed are averaged on uniform river sections. Pools, frequently occurring in mountain streams, decrease flow velocity and increase longitudinal dispersion (mixing in direction of flow). In the model these irregularly distributed pools of varying shape are approximated by a dead zone compartment with constant depth, which is connected to the advective zone by an exchange process. The exchange coefficient and the area of the pool zone has to be determined by tracer experiments and parameter

estimation. The estimation of dead zone parameters and friction factor is difficult because friction and exchange with the pool zone have similar effects on flow velocity. Therefore, the friction resistance of the river is estimated with the aid of an empirical formula which has been derived for river sections without pools and is based on the slope and grain size distribution parameters.

Transport-  
reaction-  
model

If the equations of the hydraulic base model are extended by a transport equation with a transformation term, transport and transformation of dissolved substances can be simulated with this extended transport-reaction model.

Heat transport  
model

The heat transport model is a modification of the transport-reaction model in which heat exchange rates replace the transformation term. The heat transport model considers all energy flows that influence water temperature in mountain streams: short-wave radiation, incoming and outgoing long-wave radiation, heat exchange with the sediment, dissipation of kinetic energy (frictional heat), evaporation and convection (thermal conduction at the water surface). For the simulation of water temperature, measurements of input water temperature and meteorological parameters are required, and for model calibration, measurements of water temperature at the end of the river section are also necessary.

Measurement  
campaign  
in valley Blenio

The grain size distribution was measured at different locations of several streams in the Blenio valley. At different stream discharges, which occurred during normal power plant operation or that were increased by a reduction of the water intake rate of the power plant, tracer experiments with salt and uranine were conducted and hydraulic variables were measured. In addition, substance concentrations were measured below the outlet of the wastewater treatment plant of Olivone. Water temperature has been measured during two years at 35 different locations. The measurements of three meteorological stations (two of them installed for this project) were used. Finally, water temperature in the sediment was also measured at some locations.

Results:  
1. Implemented  
models

The models described above were implemented in the computer program AQUASIM. These implementations significantly facilitate the use of these models in other applications. With the aid of the measurements, the models were calibrated and validated for the rivers Brenno del Lucomagno and Brenno. Thus, discharge, mean flow velocity, substance concentration, and water temperature can be calculated in these rivers.

2. Estimation of  
parameters of  
hydraulic model

The cross-sectional area of the pool zone and the exchange coefficient cannot be measured directly because these are effective parameters of a simplified model and the real river geometry varies to a great extent. The estimates gained for these parameters with the aid of tracer data do not significantly depend on discharge but are different for different rivers. Therefore, a single tracer experiment leads to a tremendous reduction in

