**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

**Band:** 94 (2003)

Heft: 2

**Artikel:** Alpine Wasserkraftwerke und ihre "Fernwirkung" auf talwärts liegende

Gewässer

Autor: Wüest, Alfred

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-857512

### 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:** 15.11.2025

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

# Alpine Wasserkraftwerke und ihre «Fernwirkung» auf talwärts liegende Gewässer

Alpine Wasserkraftwerke beeinflussen neben den direkt betroffenen Gewässern auch weit entfernte, talwärts liegende Flüsse und Seen. Beispielsweise nimmt der Schwebstofftransport in Flüssen unterhalb von Stauseen ab, was letztlich Auswirkungen auf die Sauerstoffbedingungen in tiefer liegenden Seen hat. Neben Schwebstoffen werden auch Nährstoffe in den Stauseen zurückgehalten. So führte man den Zusammenbruch der Binnenlachspopulation im kanadischen Columbia River darauf zurück, dass nach dem Bau mehrerer Dämme die Nährstoffkonzentration in den unterliegenden Seen abnahm. Auch wird durch die Wasserkraftnutzung der Wärmehaushalt tiefer liegender Flüsse verändert.

### Hohe Bedeutung der Wasserkraft

Wasserkraft ist für unsere Wirtschaft und Gesellschaft von enormer Bedeutung. Mit 38 TWh pro Jahr produzieren die Schweizer Wasserkraftwerke 58% des inländischen Elektrizitätsaufkommens, wovon etwa 60% in den Alpen realisiert werden. In den letzten 50 Jahren wurden dafür über 130 Stauseen gebaut. Mit einem Gesamtvolumen von 4 km³ können sie etwa einen Viertel des jährlichen Abflusses aus allen alpinen Einzugsgebieten (Rhone, Ticino, Inn, Rhein, Reuss und Aare) zurückbehalten.

Alpen treten auch Effekte in entfernten, talwärts liegenden Flussabschnitten, Seen und Randmeeren auf (Bild 1 [1]). Die immer wieder geäusserte Kritik an der Wasserkraft [2] verlangt deshalb auch eine differenziertere Einschätzung dieser oft wenig beachteten Beeinträchtigungen. Ziel dieses Beitrags ist, einige dieser gemeinsam mit dem Strom ins Unterland exportierten ökologischen Defizite aufzuzeigen.

#### Stauseen als Partikelfallen

Seit dem Bau der etwa 50 Talsperren im Einzugsgebiet der Rhone hat sich der

jährliche Schwebstoffeintrag in den Genfersee um fast 50% auf ca. 1,5 Mio. Tonnen verringert (Bild 2 [3]). Da der grosse Strombedarf hauptsächlich im Winter auftritt, wird das Wasser in den Stauseen meist länger als ein halbes Jahr gespeichert, bevor es turbiniert wird. In dieser Zeit lagert sich ein Grossteil der im Wasser vorhandenen Schwebstoffe in den Stauseen ab. Als weitere Folge der Stauseen ging auch die Hochwasserhäufigkeit in der Rhone deutlich zurück. Lag der Abfluss vor dem Bau der Stauseen jährlich an rund 23 Tagen über 500 m<sup>3</sup>/s, ist dies heute nur noch an etwa fünf Tagen der Fall [3].

Die verringerte Schwebstofffracht und die reduzierte Hochwasserhäufigkeit verändern die Hydraulik der meisten tiefer liegenden Schweizer Voralpenseen. Der Grund liegt darin, dass die Dichte von Flusswasser, neben der Temperatur und den gelösten Stoffen, vor allem von der Schwebstoffkonzentration abhängt. Ist die Schwebstoffkonzentration grösser als rund 0,5 g/l (Tabelle I), wird das Zuflusswasser schwerer als das Seewasser und taucht in die Tiefe ab. Dies ist vor allem bei gewitterbedingten Hochwassern mit erhöhter Schwebstofffracht der Fall. Die Folge ist eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser.

Dies geschieht einerseits direkt, weil das abtauchende Flusswasser grosse Mengen Sauerstoff in das Tiefenwasser der Seen verfrachtet. In einem Gutachten

## Export ökologischer Defizite ins Unterland

Solch intensive Nutzung ist jedoch nicht ohne ökologische Auswirkungen auf die betroffenen Gewässer (siehe Kasten). Neben den meist bekannten und eher lokalen Einflussfaktoren in den

### Adresse der Autoren

Alfred Wüest Leiter der Abteilung «Angewandte Gewässerökologie» EAWAG Seestrasse 79 6047 Kastanienbaum

#### Koautoren

Lorenz Moosmann, Gabriela Friedl

Quelle: EAWAG news 55d www.eawag.ch

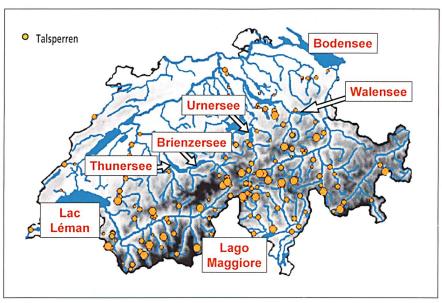


Bild 1 Wasserkraft wirkt auf Alpenflüsse und Alpenrandseen (swissdams.ch/Dams/damMap).

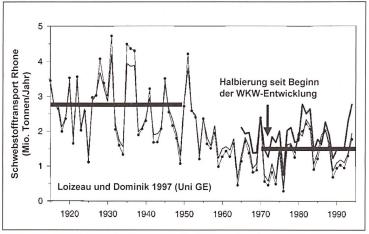


Bild 2 Schwebstoffeintrag der Rhone in Genfersee [3].

der EAWAG [4] wurde gezeigt, dass im Juli 1994 durch mehrere solcher Ströme von dichterem Flusswasser etwa 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser des Brienzersees eingetragen wurden (Bild 3a). Dabei kam es vor allem im tiefsten Bereich zu einer drastischen Erhöhung des Sauerstoffgehalts (Bild 3b). (Zum Vergleich: In die künstlich belüfteten Mittellandseen werden pro Sommer weniger als 500 Tonnen Sauerstoff eingebracht.)

Andererseits ist das dichtere Flusswasser wärmer als das tiefe Seewasser und es kommt mit jedem Eintrag zu einer leichten Erwärmung des Tiefenwassers (Bild 3c). Über Jahre hinweg steigt die Temperatur des Tiefenwassers kontinuierlich an – beispielsweise im Genfersee um bis zu 1,5 °C [5]. In der Folge wird die Dichteschichtung im Tiefenwasser schwächer, was den See auf eine wirksame, tief greifende Durchmischung vorbereitet. Eine solche vollständige Durchmischung findet sporadisch etwa alle 5–10 Jahre statt und bringt ebenfalls sauerstoffhaltiges Wasser in die tiefsten Bereiche des Sees.

Kurzfristige partikelbeladene Hochwasserspitzen erfüllen deshalb in allen grossen Voralpenseen der Schweiz (Tabelle I) eine wichtige ökologische Funktion. Der direkte und indirekte O2-Nachschub trugen in der Vergangenheit wesentlich dazu bei, dass diese Seen (mit Ausnahme des Luganersees) auch in Zeiten starker Nährstoffbelastung immer verhältnismässig gute Sauerstoffbedingungen aufwiesen. Je seltener abtauchende Ströme von dichterem Flusswasser auftreten, desto ungünstiger entwickeln sich die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser. Aus seeökologischer Sicht ist daher eine weitere Abnahme partikelbeladener Hochwasserspitzen unerwünscht.

### Stauseen als Nährstofffallen

Mit den Schwebstoffen werden auch Nährstoffe in den Stauseen zurückgehalten. Während diese Wirkung in unseren überdüngten Schweizer Einzugsgebieten einen positiven Nebeneffekt darstellt, kann es in nährstoffarmen Regionen zu negativen Veränderungen der aquatischen Fauna und Flora kommen. Dieser Umstand wurde ins Bewusstsein gerufen, als Ende der 80er-Jahre die Population des einzigartigen Binnenlachses «Kokanee» im Kootenay Lake und in den Arrow Lakes (Britisch-Kolumbien, Kanada) in beunruhigender Weise zusammenbrach (Bild 4). Diese Seen liegen am Kootenay bzw. Columbia River, welche je durch zwei grosse Dämme aufgestaut wurden. Seit dem Bau dieser Stauseen gelangen jährlich rund 50 t Phosphor weniger in die beiden Seen [6].

Mangels anderer überzeugender Argumente wurde der Nährstoffrückhalt durch die Stauseen als wahrscheinlichste Ur-

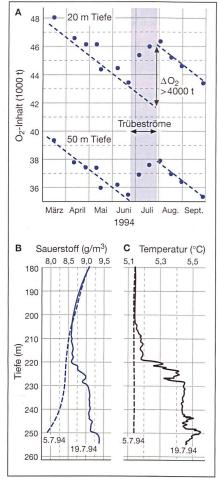


Bild 3 Sauerstoffhaushalt im Tiefenwasser des Brienzersees im Sommer 1994: Mehrere gewitterbedingte warme und partikelbeladene Dichteströme aus der Aare und Lütschine transportierten im Juli während weniger Stunden ca. 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser (A). Der Eintrag von Sauerstoff (B) und Wärme (C) erfolgte zwischen dem 5. und 19. Juli vorwiegend in den tiefsten 50 m.

sache der «Kokanee-Krise» identifiziert. Deshalb werden der Kootenay Lake seit 1992 und die Arrow Lakes seit 1999 jährlich mit etwa 50 t Phosphor und 200 t

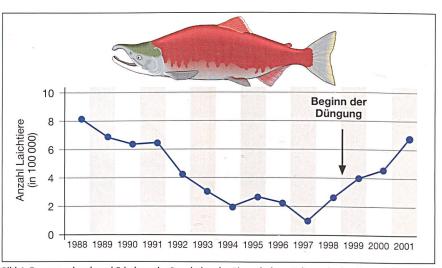
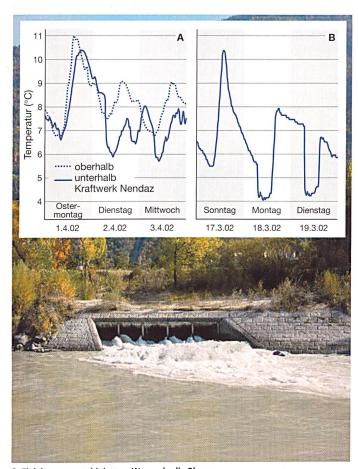


Bild 4 Zusammenbruch und Erholung der Population des Binnenlachses Kokanee in den Arrow Lakes [6].



Bild 5 Floss mit Nährstofftanks auf dem Kootenay Lake, der seit 1992 jährlich mit über 50 t Phosphor gedüngt wird [6]. (Foto: K. Ashley, Kanada)



Kraftwerks Nendaz (Linie) vom 1. bis 3. April 2002. Während am Ostermontag (ohne Kraftwerksbetrieb) die Temperatur mittags über 10 °C anstieg, senkte das kalte Wasser der **Grande Dixence** werktags die Temperatur zur gleichen Tageszeit unter 6 °C. Bild 6b Temperaturverlauf in der Lonza (Zufluss zur Rhone) unterhalb des Kraftwerks Lötschen am 17. bis 19. März 2002. Aus den gleichen Gründen variierte die Temperatur von Sonntag bis Montag mehr als 6 °C.

Bild 6a Temperaturverlauf in der Rhone

oberhalb (punktiert)

und unterhalb des

6 Einleitung von tubiniertem Wasser in die Rhone (Beispiel Mauvoisin).

Stickstoff gedüngt (Bild 5). Ob die in wissenschaftlichen Kreisen kontrovers diskutierte Notmassnahme – es wurde der totale Verlust des Binnenlachses befürchtet – wirksam war, kann noch nicht abschliessend bewertet werden. Jedoch stabilisierte sich die Zahl der geschlechtsreifen Binnenlachse erfreulicherweise wieder auf früherem Niveau (Bild 4) [6]. Daneben untersuchte die EAWAG, ob auch andere Faktoren zum Zusammenbruch der Kokanee-Population beitragen konnten [7]. Es zeigte sich,

dass das zusätzliche Aufstauen der Arrow Lakes und insbesondere die Tiefe des Wasserauslasses, tatsächlich kritisch auf das Auswaschen der Biomasse wirken.

Gelöste Nährstoffe werden unter entsprechenden Voraussetzungen in Stauseen auch selektiv zurückgehalten. Bei genügend langer Aufenthaltszeit können Kieselalgen den Nährstoff Kieselsäure weitgehend aus dem Wasser entfernen [8]. Flüsse aus den Bergen Nordschwedens beispielsweise, deren Wasser aus Stauseen stammt, transportieren bis zu 60% weniger Kieselsäure ins Baltische Meer, als dies bei Flüssen aus unverbauten Einzugsgebieten der Fall ist [9]. Es wird deshalb befürchtet, dass die Kieselalgen im Baltischen Meer zunehmend durch unerwünschte Arten verdrängt werden und sich dadurch die Zusammensetzung der Zooplankton- und Fischgemeinschaft verschiebt. Ein ähnlicher Effekt im System «Donau/Schwarzes Meer» wird zurzeit im Rahmen eines Projektes am Staudamm des «Eisernen Tors» von der EAWAG untersucht.

## Stauseen als Modulatoren der Flusstemperatur

Die Wasserkraftnutzung verändert neben dem Partikel- und Nährstoffhaushalt auch den Wärmehaushalt der tiefer liegenden Gewässer: Beim Turbinieren wird potenzielle Energie in Strom umgewandelt, die unter natürlichen Abflussbedingungen das Flusswasser via Reibung erwärmen würde. Dies führt zu einer Abkühlung des Flusses bei der Wasserrückgabe. Für die gesamten Schweizer Alpen ergibt sich eine mittlere Temperaturreduktion von 1,1 °C in den sonst schon kühlen alpinen Flüssen – wobei der Effekt in der Rhone mit 1,6 °C am grössten ist.

Im jahreszeitlichen und täglichen Verlauf greift diese Abschätzung jedoch zu kurz, da verschiedene indirekte Einflüsse zum Tragen kommen. Über die Oberfläche der Stauseen (im Rhoneeinzugsgebiet sind es etwa 14 km<sup>2</sup>) wird im Sommer eine enorme Wärmemenge gespeichert und teilweise auf den Winter übertragen. Das turbinierte Wasser, welches vom Grund der drei grossen Stauseen stammt, weisst deshalb ganzjährig eine ausgeglichene Temperatur zwischen 4 und 5,5 °C auf. Im Winter erwärmt das temperierte Stauseewasser die wenig Wasser führende Rhone bei der Rückgabe typischerweise um 0,5 °C. Im Sommer vermindert der Stauseerückhalt den Abfluss und trägt somit, vor allem in den Restwasserstrecken, zur Erwärmung bei. Bei der Rückgabe des kälteren Stauseewassers wird die Rhone anschliessend abrupt gekühlt, wobei die Temperatursprünge mehrere °C betragen können (Bilder 6a und 6b).

Mit der zurzeit im Rahmen des Revitalisierungsprojektes Rhone/Thur durchgeführten Untersuchung soll die Wirkung der hydroelektrischen Nutzung auf das thermische Regime und die Konsequenzen für die Lebewesen der Rhone aufgezeigt werden.

13

### Einflussfaktoren von Stauseen auf tiefer liegende Gewässer im globalen Kontext [2]

Veränderungen in *kursiver Schrift* sind bei alpiner hydroelektrischer Nutzung von Bedeutung.

Hydrologie: Saisonale Verschiebung der Abflussganglinie, Rückgang der Hochwasserhäufigkeit, Schwall und Sunk, Restwasser, Modifikation des Grundwasserniveaus, Änderung der internen Hydraulik in voralpinen Seen, Wasserverlust.

Flussmorphologie und Feststoffhaushalt: Schwebstoffrückhalt, zeitliche Verschiebung der Trübung sowie des Partikel- und Nährstofftransports, Kolmation, Stagnation der Morphodynamik, Erosion, Delta- und Küstenrückzug.

Geochemische Kreisläufe: Primärproduktion, Modifikation der Wasserqualität, Selbstreinigung und Nährstoffrückhalt in den Reservoiren, anoxische Reservoirabflüsse, Freisetzung von reduzierten Substanzen und Metallen, Methanfreisetzung.

Fluss- und Auenökologie: Verschiebung der Artenzusammensetzung, Unterbruch der Durchlässigkeit, Verlust von überschwemmten Feuchtgebieten, Auen und FlussLand-Übergangsbereiche, neue Feuchtgebiete im Stauwurzelbereich

Fischökologie: Behinderung der Migration und Fragmentierung der Populationen, Verschiebung von «Fluss»- zu «See»-Arten, Überflutung der Laichgründe, Verschiebung des Wärmehaushalts, Abnahme der Lebensqualität in den Restwasserund Schwall-Sunk-Strecken, Gasblasenkrankheit, anoxische Reservoirabflüsse.

# Aktuelle Schweizer Herausforderungen

Seit den 80er-Jahren warnen die Fischer des voralpinen Brienzersees vor potenziellen ökologischen Veränderungen durch die hydroelektrische Nutzung im Grimselgebiet. In der Folge wurde die mögliche Beeinflussung der Trübung, welche wegen der Stauseen einen veränderten saisonalen Verlauf aufweist, in mehreren Beratungsstudien von der

See/Fluss/Messstation	Jährliche Schwebstofffracht (Mio.t/Jahr)	Mittlerer Schwebstoff- gehalt im Sommer (g/l)
Bodensee (Rhein, Diepoldsau)	3,6	0,91
Genfersee (Rhone, Porte du Scex)	1,9	0,52
Brienzersee (Lütschine, Gsteig)	0,16	0,39
Walensee (Linth, Mollis)	0,11	0,18
Brienzersee (Aare, Brienzwiler)	0,11	0,14
Langensee (Ticino, Bellinzona)	0,47	0,12
Urnersee (Reuss, Seedorf)	0,05	0,047

Tabelle I Schwebstoffeintrag in die Voralpenseen der Schweiz (Daten: BWG/LHG, Bern).

EAWAG untersucht [4]. Als es im Jahr 1999 zu einem massiven Einbruch der Fischerträge und der Daphnienpopulation im Brienzersee kam, entschied sich der Kanton Bern, die ökologische Funktion des Brienzersees und deren mögliche Veränderungen genauer zu analysieren. Es wurden neun Hypothesen formuliert, die in den nächsten Jahren in diversen Forschungsprojekten überprüft werden sollen. Die EAWAG wird sich sowohl in einer begleitenden Expertengruppe als auch durch einzelne Forschungsarbeiten (Fische, biologische Produktion, Partikelschichtung usw.) an diesem Projekt beteiligen. Zu belegen, welche der diversen Einflussfaktoren zur Diskussion stehen auch das Klima und der Nährstoffrückgang wegen der Kläranlagen - die entscheidende «Fernwirkung» auf den Brienzersee hatten, stellt eine grosse Herausforderung dar.

#### Referenzen

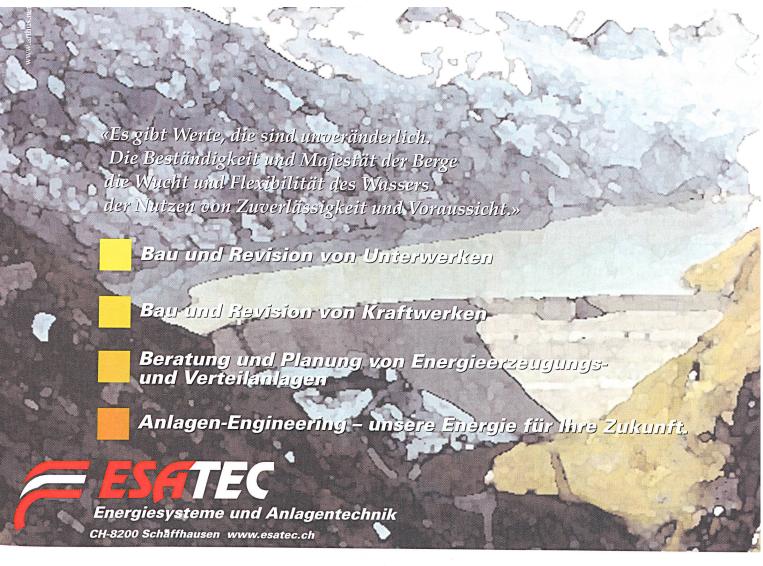
[1] Friedl G., Wüest A. (2002): Disrupting biogeochemical cycles – consequences of damming. Aquatic Sciences 64, 55–65.

[2] World Commission of Dams (2000): Dams and development – a new framework for decision-making. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling VA, USA and World Commission of Dams, Cape Town, www.dams.org.

- [3] Loizeau J.-L., Dominik J. (2000): Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva. Aquatic Sciences 62, 54–67.
- [4] Sturm M., Siegenthaler C., Suter H.P., Wüest A. (1996): Das Verhalten von Schwebstoffen im Brienzersee (Untersuchungsergebnisse der Jahre 1994–1995). EAWAG Auftrag Nr. 84109, 102 S.
- [5] Livingstone D.M. (1993): Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: a short-term climatic change indicator? Verhandlungen der internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 25, 75–81.
- [6] Ashley K., Thompson L.C., Sebastian D., Lasenby D.C., Smokorowski K.E., Andrusak H., (1999): Restoration of kokanee salmon in Kootenay Lake, a large intermountain lake, by controlled seasonal additions of nutrients. In: Murphy T., Munawar M. (eds.) Aquatic Restoration in Canada. Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, p. 127–170.
- [7] Matzinger A., Wüest A. (2001): The effect of cascading on nutrient pathways and productivity in dams towards a sensitivity analysis, Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, ISEH, Tempe, Arizona, USA.
- [8] Humborg C., Conley D.J., Rahm L., Wulff F., Cociasu A., Ittekott V. (2000): Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. Ambio 29, 44–49.
- [9] Conley D.J., Stalnacke P., Pitkanen H., Wilander A. (2000): The transport and retention of dissolved silicate by rivers in Sweden and Finland. Limnology and Ocenography 45, 1850–1853.

### Les centrales hydrauliques alpines et leurs répercussions sur les lacs et les cours d'eau en plaine

En plus des lacs et des cours d'eau directement concernés, les aménagements hydrauliques alpins influencent aussi des rivières et des lacs en plaine. Par exemple le transport des solides en suspension diminue sur les rivières en aval des lacs de retenue, une conséquence qui se répercute finalement sur la teneur en oxygène des lacs en aval. Outre les charges solides en suspension, les substances nutritives sont aussi retenues dans les bassins d'accumulation. Ainsi, la chute de la population de saumons dans la Columbia River canadienne est due au fait que suite à la construction de plusieurs barrages, la concentration en substances alimentaires a diminué dans les lacs en aval. L'utilisation de la force hydraulique modifie également l'équilibre thermique des rivières situées en aval.





Bulletin SEV/VSE 2/03

### **VOITH SIEMENS**

### HYDRO POWER GENERATION

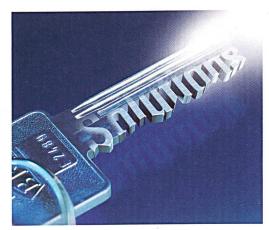
### **Unser Angebot:**

- Gesamtausrüstungen für Wasserkraftwerke.
- Francis-, Pelton-, Kaplan-, und Kaplan-Rohrturbinen,
   Pumpturbinen, Standardturbinen.
- Speicherpumpen, Radial-, Halbaxial- und Axialpumpen.
- Generatoren bzw. Generator-Motoreinheiten für alle Turbinentypen.
- Erreger- und Diagnosesysteme.
- Schaltanlagen für alle Spannungsebenen, Transformatoren, Frequenzumrichter, Schutzsysteme.
- Leitsysteme für Kraftwerke,
   Automatisierung mit Mess-,
   Regel-, Steuerungssystemen,
   Leitstellen in Kraftwerksketten,
   Optimierungs- und
   Diagnoseeinrichtungen.
- Absperrorgane.
- Service und Modernisierung bestehender Wasserkraftanlagen.
- Beratung, Engineering,Montage und Inbetriebsetzung.
- System-/Anlagenbewertung.



Voith Siemens Hydro Kraftwerkstechnik GmbH & Co. KG Alexanderstrasse 11 89522 Heidenheim/Germany Tel. +49/7321/37 6121 Fax +49/7321/37 7128 www.vs-hydro.com











Voith Siemens Hydro Power Generation ist ein weltweit führender Anbieter von Ausrüstungen und Dienstleistungen für die Wasserkraft.
Eine unschlagbare Verbindung mit einem Partner, der sein globales Know-How in Ihr Projekt einbringt.

# Profitieren Sie von: More.

Powerful. Solutions.

Bulletin SEV/AES 2/03