

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.

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 ein Viertel des jährlichen Abflusses aus allen alpinen Einzugsgebieten (Rhone, Ticino, Inn, Rhein, Reuss und Aare) zurückbehalten.

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 Alpen treten auch Effekte in entfernten, talwärts liegenden Flussabschnitten, Seen und Randmeeren auf [1]. Die weltweite Kritik an der Wasser-

kraft [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 (siehe auch Artikel von M. Fette S. 21).

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 [3]. Da der grosse Strombedarf hauptsächlich im Winter auftritt, wird das Wasser in den Stauseen meist länger als ein halbes Jahr gespeichert, bevor es turbinert 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

ca. 23 Tagen über 500 m³/s, ist dies heute nur noch an etwa 5 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 ca. 0,5 g/l (Tab. 1),

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 Reservoirs, anoxische Reservoirabflüsse, Freisetzung von reduzierten Substanzen und Metallen, Methanfreisetzung.

Fluss- und Auenökologie:

Verschiebung der Artenzusammensetzung, Unterbruch der Durchlässigkeit, Verlust von überschwemmten Feuchtgebieten, Auen und Fluss-Land 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 Restwasser- und Schwall-Sunk-Strecken, Gasblasenkrankheit, anoxische Reservoirabflüsse.

See/Fluss/Messstation	Jährliche Schwebstofffracht ¹ (Mio.t/Jahr)	Mittlerer Schwebstoffgehalt im Sommer ² (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

¹ Jahresmittel von 1979 bis 1993 [LHG, Bern] (Schwebstoffe im 14-tägigen Rhythmus).

² Frachtgemittelte Schwebstoffkonzentration im Sommer (Juni bis August).

Tab. 1: Schwebstoffeintrag in die Voralpenseen der Schweiz (Daten: BWG/LHG, Bern)

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 Binnenlachs «Kokanee» im Kootenay Lake und in den Arrow Lakes (Britisch-Kolumbien, Kanada) in beunruhigender Weise zusammenbrach (Abb. 2). Diese Seen liegen am Kootenay bzw. Columbia River, welche je durch zwei grosse Dämme aufgestaut wurden. Seit dem Bau dieser Stauseen gelangen jährlich ca. 50 t Phosphor weniger in die beiden Seen [6].

Mangels anderer überzeugender Argumente wurde der Nährstoffrückhalt durch die Stauseen als wahrscheinlichste Ursache der «Kokanee-Krise» identifiziert. Deshalb werden der Kootenay Lake seit 1992 und die Arrow Lakes seit 1999 jährlich mit ca. 50 t Phosphor und 200 t Stickstoff gedüngt (siehe Foto S. 20). Ob die in wissenschaftlichen Kreisen kontrovers diskutierte Notmassnahme – es wurde der totale Verlust des Binnenlachs befürchtet – wirksam war, kann noch nicht abschliessend bewertet werden. Jedoch stabilisierte sich die Zahl der geschlechtsreifen Binnenlachs erfreulicherweise wieder auf früherem Niveau (Abb. 2) [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 Wasseranlasses, 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

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 der EAWAG [4] wurde gezeigt, dass im Juli 1994 durch mehrere solcher Ströme von dichtem Flusswasser etwa 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser des Brienersees eingetragen wurden (Abb. 1A). Dabei kam es vor allem im tiefsten Bereich zu einer drastischen Erhöhung des Sauerstoffgehalts (Abb. 1B). (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 (Abb. 1C). 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, tiefgreifende 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 (Tab. 1) 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 dichtem Flusswasser auftreten, desto ungünstiger entwickeln sich die Sauerstoffverhältnisse im

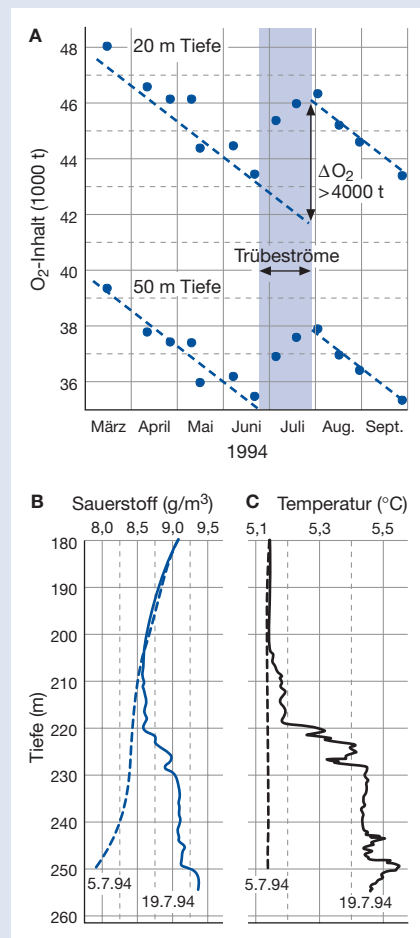


Abb. 1: Sauerstoffhaushalt im Tiefenwasser des Brienersees im Sommer 1994: Mehrere gewitterbedingte warme und partikelbeladene Dichteströme aus der Aare und Lütchine transportierten im Juli während weniger Stunden ca. 4000 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser (A). Der Eintrag von Sauerstoff (B) und Wärme (C) erfolgte zwischen dem 5. und 19. Juli vorwiegend in den tiefsten 50 m.

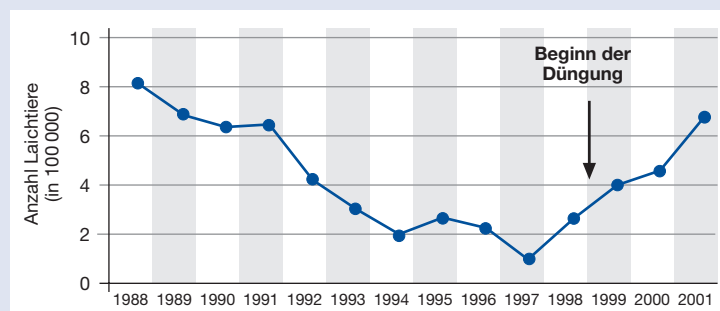


Abb. 2: Zusammenbruch und Erholung der Population des Binnenlachs Kokanee in den Arrow Lakes [6].



K. Ashley, Kanada

Floss mit Nährstofftanks auf dem Kootenay Lake, der seit 1992 jährlich mit über 50 t Phosphor gedüngt wird [6].

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 km²) wird im Sommer eine enorme Wärmemenge gespeichert und teilweise auf den Winter übertragen. Das turbinierete Wasser, welches vom Grund der drei grossen Stauseen stammt, weisst deshalb ganzjährig eine ausgeglichene Temperatur zwischen 4 und 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 (Abb. 3A + B). Mit der zurzeit im Rahmen des Revitalisierungsprojektes Rhone/Thur (siehe auch Artikel von M. Fette S. 21) durchgeführten Untersuchung soll die Wirkung der hydroelektrischen Nutzung auf das thermische Regime und die Konsequenzen für die Lebewesen der Rhone aufgezeigt werden.

Aktuelle Schweizer Probleme

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 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 etc.) an diesem Projekt beteiligen. Zu belegen, welche der diversen Einflussfaktoren die entscheidende «Fernwirkung» auf den Brienzersee hat, stellt eine grosse und weitreichende Herausforderung dar.



Alfred Wüest, Physiker und Leiter der Abteilung «Angewandte Gewässerökologie». Titularprofessor für Aquatische Physik an der ETH Zürich. **Forschungsgebiet: Mischungs- und Transportprozesse in Seen und Reservoirs, Einfluss der menschlichen Nutzung auf Stoffkreisläufe in Gewässern.**

Koautoren:

Lorenz Moosmann, Gabriela Friedl

- [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. 84 109, 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., Ittekkott 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 Oceanography* 45, 1850–1853.

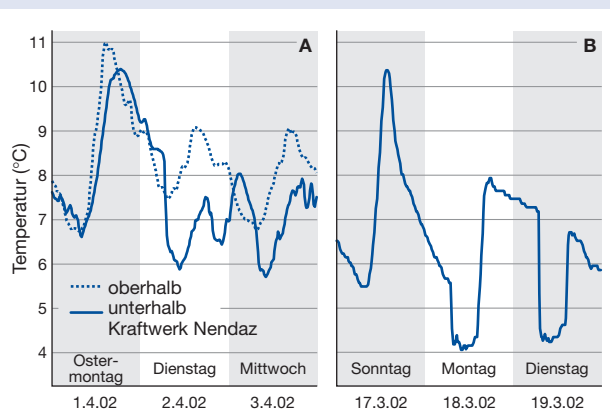


Abb. 3: (A) Temperaturverlauf in der Rhone oberhalb (punktiert) und unterhalb des Kraftwerks Nendaz (Linie) vom 1.–3. April 2002. Während am Ostermontag (ohne Kraftwerksbetrieb) die Temperatur mittags über 10 °C anstieg, senkte das kalte Wasser der Grande Dixence werktags die Temperatur zur gleichen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