

Die Entleerungen des Räterichsbodensees 2014/15 und 2016 – eine gewässerökologische Bestandsaufnahme

Steffen Schweizer, Matthias Meyer, Kurt Wächter, David Tanno, Sandro Schläppi, Peter Büsser, Andrea Baumann, Jan Baumgartner, Martin Flück, Willy Müller, Markus Zeh

Zusammenfassung

Im Zuge des KWO-plus-Ausbauprojekts «Tandem» und der Erneuerung einer Drosselklappe musste der Räterichsbodensee jeweils in den Wintern 2014/15 und 2015/16 entleert werden. Mit umfangreichen Schutzmassnahmen konnten die ökologischen Beeinträchtigungen deutlich reduziert werden. Für die Entleerungen fungierte das Fischereinspektorat des Kantons Bern als Leitbehörde und war für die Bewilligung und Koordination der Arbeiten verantwortlich. Die gewässerökologisch relevanten Arbeiten erfolgten unter seiner Aufsicht. Ein detailliertes Monitoringprogramm erlaubte eine relativ gute Einschätzung der Situation. Aufgrund des Auftauens von Permafrostboden werden künftig wahrscheinlich deutlich mehr Murgangereignisse mit z.T. sehr hohen Konzentrationen an Trübstoffen auftreten. Ausserdem dürfte auch der Sedimenteintrag in die Stauseen künftig deutlich zunehmen.

1. Rahmenbedingungen der Entleerungen

1.1 Projekt Tandem

Zwischen 2009 und 2010 erfolgte u. a. für das Ausbauprojekt «Tandem» ein breit angelegter Begleitgruppenprozess, bei dem Vertreter von kantonalen Ämtern, von Umwelt- und Fischereiverbänden, der Region und der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) beteiligt waren (Schweizer et al. 2010a und 2010b). Dabei konnte eine Einigung hinsichtlich der umweltrelevanten Rahmenbedingungen erzielt werden. Das Projekt «Tandem» trägt einen wesentlichen Beitrag zur geplanten Energiewende in der Schweiz hinsichtlich zusätzlicher Stromproduktion (mit der gleichen Menge an gefasstem Wasser) sowie zur Flexibilitätssteigerung der Energieproduktion bei.

Aus gewässerökologischer Sicht musste zunächst die mit dem Ausbau

verbundene Akzentuierung des Abflussregimes (Schwall/Sunk) berücksichtigt werden. Dies führte dazu, dass sowohl ein Variantenstudium zur Schwalldämpfung als auch die Festlegung auf die entsprechende Massnahme bereits vor dem offiziellen Terminplan der Sanierung Schwall/Sunk angegangen wurden (vgl. Schweizer et al. 2013a, 2013b, 2013c und 2013d).

1.2 Auswirkungen einer See-Entleerung und Einbezug der kantonalen Fachstellen

Im Zuge einer umfassenden technischen Prüfung zeigte sich, dass eine Realisierung des Ausbauprojekts nur mit einer vollständigen Absenkung des Räterichsbodensees möglich ist. Entleerungen von Stauseen verursachen i. d. R. sehr hohe Trübstoffwerte in den Gewässern unterhalb der Dämme. Die direkten Auswirkungen auf die aquatischen Organismen hängen dabei von der Kombination aus Schwebstoffkonzentration und Expositionsdauer ab. Eine Staumentleerung verursacht zudem fast immer eine Kolmation der Sohle (sowohl innerhalb als auch auf dem Gewässerbett). Im Fall der Räterichsbodensee-Entleerung muss zudem der Einfluss der Schwebstofffracht auf die Verhältnisse im Brienersee berücksichtigt werden. Ausserdem können grossflächige Ablagerungen von Sedimenten die Hochwassersicherheit in der Hasliaare beeinträchtigen.

Aufgrund dieser verschiedenen, z. T. schwer vorhersehbaren Auswirkungen auf das Gewässer wurden die Vertreter der kantonalen Fachstellen und der betroffenen Schwellenkorporationen frühzeitig in die Planung miteinbezogen. Als Leitbehörde fungierte das Fischereinspektorat des Kantons Bern, das für die Bewilligung und Koordination der gewässerökologisch relevanten Arbeiten zuständig war. Immerhin konnte bei der Detailplanung der ökologischen Schutzmassnahmen auf wichtige Erfahrungswerte von verschiedenen Grundablasskontrollen des Räterichsbo-

densees, auf die jährlichen Beckenentleerungen in Hopflauen sowie auf die Entleerung des Räterichsbodensees von 1991 zurückgegriffen werden. Dabei konnten wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trübstoffe und des physikalischen sowie biologischen Monitorings gewonnen werden.

Grundsätzlich beeinflusst eine Seeentleerung auch die Energieproduktion. Während der Entleerung des Räterichsbodensees konnten die Zuflüsse aus mehreren Fassungen im Aaretal nicht mehr gefasst werden. Hinzu kommt, dass der Hauptstrang «Räterichsbodensee–Handeck–Innertkirchen» in dieser Zeit nicht mehr für die Stromproduktion zur Verfügung stand und dadurch die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Kraftwerke im Oberhasli sehr stark eingeschränkt waren.

1.3 Festlegung des Zeitraums für die Entleerung 2014/15

Für die Realisierung der baulichen Massnahmen ist in erster Linie die Hochwassersicherheit massgebend. Nur während der Wintermonate ist das Risiko von Hochwasserereignissen so gering, dass die Sicherheit der Baustellen im Stollen und am Seeufer ausreichend gewährleistet ist. Zusätzlich wurde versucht, den Zeitraum der Entleerung möglichst kurz zu halten, damit die oben aufgeführten Beeinträchtigungen der aquatischen Organismen und der Stromproduktion möglichst gering ausfallen. Im Widerspruch dazu stand das Bestreben, neben den eigentlichen Arbeiten für das Projekt Tandem (Anschluss des neuen Stollens zwischen KW Handeck und Räterichsbodensee) auch möglichst viele zusätzliche Revisionsarbeiten durchzuführen, die nur unter trockenen Bedingungen des Kraftwerkssystems möglich sind. Letztlich musste ein Kompromiss zwischen diesen verschiedenen Ansprüchen gefunden werden. In Absprache mit allen Beteiligten, inklusive den kantonalen Ämtern, wurde der Entleerungszeitraum vom 8. November 2014 bis Ende März 2015 festgelegt.



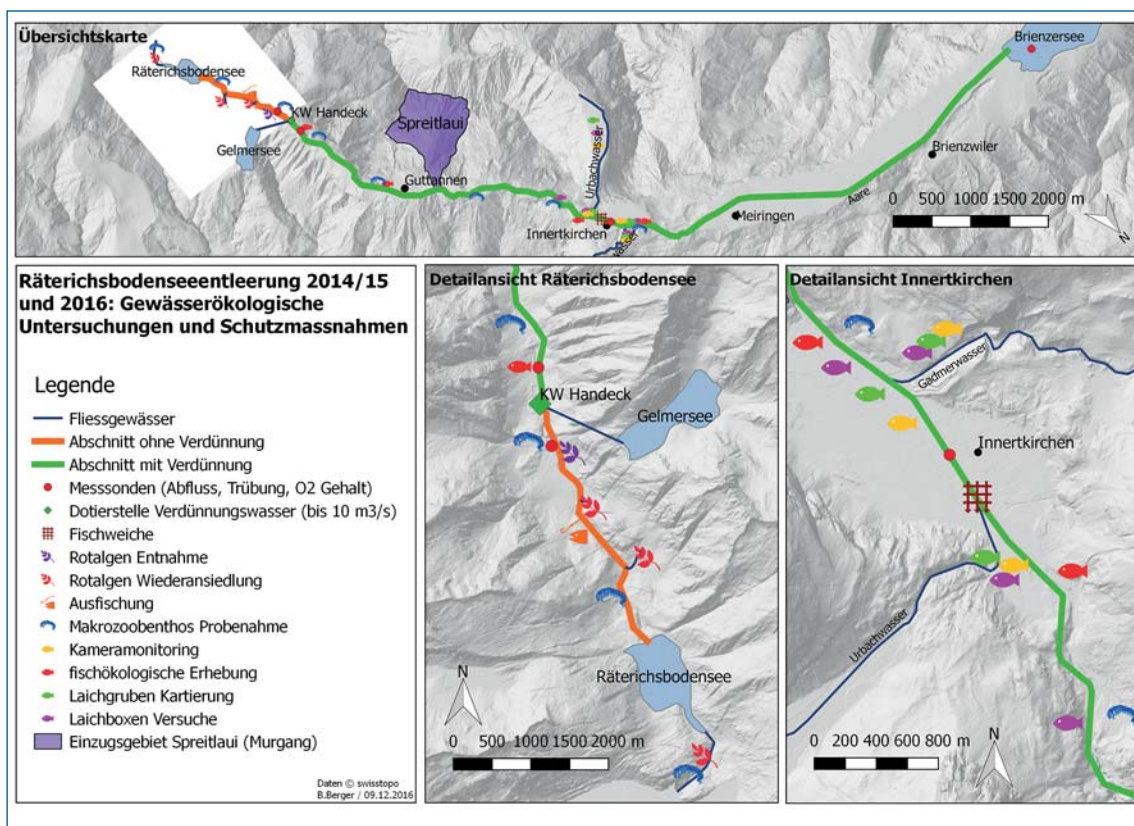


Bild 1. Übersichtskarte mit allen Schutzmassnahmen und Lage Spreitlaur (Grafik; Benjamin Berger).

Angesichts der unzähligen Abhängigkeiten dieser verschiedenen Arbeiten bedurfte es eines sehr detailliert ausgearbeiteten Arbeitsprogramms, einer ausgefeilten Logistik, einer grossen Flexibilität aller Beteiligten und einer effizienten Koordination.

Für die Realisierung des gesamten Ausbauprojekts Tandem wurde der Leitgedanke der «einfachen Lösung» in der KWO entwickelt (Biasiutti & Fischlin 2013; Stamm et al. 2016). Dieser Ansatz kam im Zuge der See-Entleerung bei allen durchzuführenden Arbeiten zum Tragen.

1.4 Entleerung 2016

Während der Entleerung 2014/15 war u. a. auch eine Revision der bestehenden Drosselklappe zwischen Räterichsbodensee und Handeck geplant. Eine detaillierte Untersuchung dieser Drosselklappe konnte allerdings erst bei leerem Stausee durchgeführt werden. Während der Entleerungsphase wurde festgestellt, dass das Gehäuse irreparabel beschädigt war. Daher musste die bestehende Drosselklappe durch eine neue ersetzt werden. Grundsätzlich benötigt die Planung und Fertigstellung eines entsprechenden Abschlussorgans mehrere Monate. Ausserdem musste der Zugangstollen zur Ersetzung dieser Drosselklappe vergrössert werden. Aus diesen Gründen war eine erneute See-Entleerung im Winter 2016 unumgänglich. Für die genaue Ter-

minplanung war bei dieser Entleerung insbesondere wieder die Baustellensicherheit ausschlaggebend. Zusätzlich wurde versucht, die ökologischen Rahmenbedingungen (möglichst im tiefen Winter mit geringen Zuflüssen in den Stausee) und die Ausnutzung möglichst vieler Synergien mit den Abschlussarbeiten zum Projekt Tandem zu berücksichtigen. Die zweite See-Entleerung fand zwischen dem 6. Februar und 4. März 2016 statt.

2. Ökologische Schutzmassnahmen und Monitoring

2.1 Grundlagen des Schutzkonzepts

Aufgrund der in Kap.1 beschriebenen Auswirkungen auf die aquatischen Organismen wurde bereits im Jahr 2011 mit der Ausarbeitung eines umfangreichen Schutzkonzepts begonnen (Limnex 2014; Meyer et al. 2014). Bei der Konzeptentwicklung wurden bereits frühzeitig die kantonalen Fachstellen Fischereinspektorat (FI), Gewässer- und Bodenschutzlabor (GBL), Amt für Wasser und Abfall (AWA) und das Tiefbauamt (TBA) sowie externe Umweltbüros (Limnex AG, Fischbiologe Peter Büsser und eQcharta) miteinbezogen. In einem ersten Schritt wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm hinsichtlich Makrozoobenthos, Wasserpflanzen, Fische und Sohlenkolmation durchgeführt. Zum Teil konnte dabei auf

frühere Untersuchungen im Rahmen der Restwassersanierung (Schweizer et al. 2010, Schweizer & Zeh Weismann 2011), des Investitionsprogramms KWO plus sowie auf die Entleerung des Räterichsbodensees von 1991 zurückgegriffen werden. Aus Vorversuchen (z. B. bei Grundablasskontrollen) konnten zudem wichtige Erfahrungswerte gewonnen werden.

2.2 Trübstoffe und Fische

Ein wesentliches Element des Schutzkonzepts war die zeitweise Verdünnung des abgelassenen Seewassers mit klarem Wasser aus dem Gelmersee ab Handeck (Bild 1). Dafür wurden – basierend auf einem von der Limnex AG vorgeschlagenen Online-Überwachungskonzept – der Abfluss, die Trübung und der Sauerstoffgehalt an verschiedenen Stellen in der Hasliaare gemessen. Als grundlegende Basis für die Wahl der Verdünnungsmenge mit Gelmerseewasser wurden die Untersuchungsergebnisse von Newcombe & Jensen (1996; Limnex 2014) verwendet. Newcombe & Jensen (1996) protokollierten die Auswirkungen von Schwebstoffkonzentration und Expositionsdauer auf die Fischfauna. Für über einen längeren Zeitraum wiederkehrende Trübstoffbelastungen wurde die Methode von Newcombe & Jensen (1996) gemäss Limnex (2014) angepasst: Sobald über 24 Stunden keine Trübstoffbelastung auftrat, wurde die Situation neu bewertet.

Auf dem Abschnitt zwischen Räte-



Bild 2. Seeforellenzaun in der Hasliaare (Bild: Andreas Funk).

richsbodensee und Handeck gab es keine technische Möglichkeit, die Hasliaare bei Bedarf mit klarem Wasser zu verdünnen. Deshalb wurden die in diesem Abschnitt vorkommenden Bachforellen und -saiblinge vorgängig zur Entleerung grossflächig und aufwendig ausgefischt.

Neben Bachforellen kommen im unteren Abschnitt der Hasliaare natürlicherweise auch Seeforellen vor. Diese steigen im Herbst vom Brienzensee zum Laichen in die Hasliaare auf. Die befruchteten Eier werden in der Sohle vergraben und entwickeln sich bei ausreichender Frischwasserzufuhr bis zum darauffolgenden Frühling. Aufgrund der hohen Trübungbelastung bei der Entleerung musste mit einer grossflächigen inneren Sohlenkolmation gerechnet werden, die eine ausreichende Frischwasserzufuhr nicht mehr erlaubt. Daher wurde mit einem Leitsystem versucht, die aufsteigenden Seeforellen daran zu hindern, oberhalb von Innertkirchen in ihre Laichhabitate zu gelangen. Dafür wurde eine neue Methodik entwickelt, bei der die aufstiegswilligen Tiere mit einer Art Bambuszaun am weiteren Aufstieg gehindert werden (Bild 2) (Meyer

et al. 2015a). Das Leitsystem wurde in der Hasliaare direkt oberhalb des Zuflusses des Urbachwassers eingesetzt, um die Seeforellen bei ihrer Laichwanderung in letzteres umzuleiten.

Eine weitere Schutzmassnahme bestand darin, die Brutanstalt Meiringen auszubauen und den Laichfischfang zu intensivieren. Damit war es möglich, deutlich mehr Forelleneier zu erbrüten. Die Verteilung der Brütlinge auf die Gewässer im Einzugsgebiet des Brienzensees erfolgte durch das kantonale Fischereinspektorat. Hier sei auch noch die Bedeutung der transparenten und offenen Kommunikation gegenüber allen betroffenen Fischereivereinen erwähnt.

2.3 Makrozo- und Phytobenthos

Aufgrund der vielen Untersuchungsstellen (in der Aare und in ihren Zuflüssen) konnte das Wiederbesiedlungspotenzial durch Invertebraten und Wasserpflanzen im Nachgang an eine Entleerung sehr gut abgeschätzt werden. Im Zuge der Restwassersanierung wurde bei den Probenahmen zudem die seltene Rotalgenart *Paralemana torulosa* bzw. *Lemanea fucina* (Limn

2008) als Erstdnachweis in der Schweiz gefunden. Da der Einfluss einer See-Entleerung auf diese seltene Art nicht bekannt ist, wurde beschlossen, Steine mit dieser Art in andere Gewässer umzusiedeln (Bild 3).

2.4 Nachspülung

Um den ursprünglichen Zustand der Sohle nach der Entleerung möglichst rasch wiederherzustellen, wurde ein Konzept für eine Nachspülung mit klarem Räterichsbodenseewasser erarbeitet. Im Sommer 2015 nach der ersten Entleerung erfolgte eine entsprechende Nachspülung mit einem Abfluss, der zwischen 10 und 20 m³/s variierte.

2.5 Monitoring

Begleitend zu den o.g. Schutzmassnahmen erfolgte vor, während und nach der See-Entleerung ein umfassendes Monitoring. Dabei wurden Daten zum Bestand des Makrozoobenthos und der Fische (Abfischungen, Laichboxversuche) erhoben. Für das Monitoring der Seeforellen wurde zudem eine neue Methodik entwickelt, bei der die Seeforellengewässer in Innertkirchen begangen wurden und mit einer Unterwasserkamera Fotos von den wichtigsten potenziellen Unterständen erstellt wurden (Meyer et al. 2015a). Ausserdem wurde das kantonale Messprogramm (Trübung, Wassertemperatur und Sauerstoff) im Brienzensee intensiviert.

3. Die Entleerungen

3.1 Die Entleerung 2014/15

3.1.1 Schutzmassnahmen im Vorlauf

Im Vorlauf zur ersten See-Entleerung konnten die im Kap. 2 beschriebenen Schutzmassnahmen vollständig umgesetzt werden.



Bild 3a links und 3b rechts. Umsiedlung Rotalgen (Bild 3a: Matthias Meyer; Bild 3b: Andrea Baumann).

3.2 Absenken via Turbinen

Auf betrieblicher Seite wurde bereits im Oktober 2014 damit begonnen, den Wasserstand im Räterichsbodensee kontinuierlich über die Kraftwerksturbinen abzusenken. Dabei wurden die Konzentration und die Menge an Feststoffpartikeln beim Einlauf in das Kraftwerk Handeck mit einer Trübungssonde online gemessen und damit wurde der mechanische Abrieb der Turbinenschaufeln sowie das Ausmass der Sedimentablagerungen im System abgeschätzt. Auf diese Weise wurde versucht, den Stausee möglichst tief über die Maschinen abzusenken, ohne einen zu grossen Verschleiss der Anlagenteile zu riskieren. Schliesslich konnte der See am 7. November bis zur Kote 1709.5 m ü. M. ausschliesslich über die Turbinen der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1 abgesenkt werden.

3.3 Öffnung des Grundablasses

Gemäss Absprache zwischen der KWO und den kantonalen Fachstellen erfolgte die eigentliche Entleerungsphase mit der Öffnung des Grundablasses am 8. November 2014 um 8:00 Uhr morgens. Dabei wurde der Grundablass so weit geöffnet, dass maximal 8 m³/s (i. d. R. 5 m³/s) über diesen aus dem Räterichsbodensee ausfliessen konnten. Bereits um 6:00 Uhr hatte man vorgängig begonnen, den Abschnitt der Hasliaare unterhalb von Handeck mit Wasser aus dem Gelmer- und teilweise aus dem Mattentalpsee langsam steigernd (von 2 auf 13 m³/s) zu dotieren.

3.4 Entwicklung der Trübstoffkonzentrationen

Wie zu erwarten war, nahm die Trübung in der Hasliaare in den ersten Stunden nach Öffnung des Grundablasses deutlich zu. Die nach *Newcombe* und *Jensen* (1996;

Limnex 2014, Kap. 2) definierten Grenzwerte konnten allerdings im Abschnitt unterhalb Handeck eingehalten werden. Nach den Erfahrungen der letzten See-Entleerung von 1991 konnte aber davon ausgegangen werden, dass in der letzten Phase des Entleerungsvorgangs – kurz bevor der See ganz leer ist – ein äusserst starker Anstieg der Trübstoffkonzentrationen zu erwarten ist. Dieser Vorgang lässt sich bildlich mit der Entleerung einer stark schmutzhaltigen Badewanne erklären: Sobald die ersten Flächen trocken sind, werden vermehrt Schmutzpartikel aufgenommen und in Richtung des Badewannenauslaufs abtransportiert. Am 8. November 2015 begann dieser Prozess etwa um 19:00 Uhr. Dabei wurden die erwarteten Trübstoffkonzentrationen bei Weitem überschritten (*Bilder 4a* und *4b*) und führten selbst im Abschnitt unterhalb von Handeck trotz einem Verdünnungsfaktor von 13 zu 1 zu einem Ausfall der Messsonden und Verfehlen der angestrebten Grenzwerte gemäss *Newcombe* und *Jensen* (1996; *Limnex* 2014). In Absprache mit dem Fischereinspektorat wurde beschlossen, bis auf Weiteres von Hand Wasserproben zu entnehmen und die Schwebstoffkonzentrationen mit Imhoff-Trichter in situ zu messen. Spätere Laborauswertungen ergaben kurzzeitige «Spitzenwerte» von rund 340 g/l unterhalb von Handeck. Zwar nahmen die Schwebstoffkonzentrationen am 9. November wieder ab, blieben aber aufgrund einer extremen Wetterlage für rund eine Woche auf sehr hohem Niveau (30 bis 140 g/l unterhalb Handeck; *Limnex* 2015). In dieser Zeit führten sehr hohe Niederschlagsmengen, verbunden mit einer für diese Jahreszeit ungewöhnlich hohen Schneefallgrenze, zu Zuflüssen in den Räterichsbodensee von über 1 m³/s. Diese Wassermengen genügten,

um grosse Mengen des sehr feinen Seesediments zu erodieren und innerhalb von einer Woche Rinnen von über 50 m Breite und 20 m Tiefe auf dem Seegrund zu formen (*Bild 5*). Entsprechend hoch waren die Schwebstoffkonzentrationen in dieser ersten Woche nach dem Öffnen des Grundablasses. Deshalb wurde das Hasliaarewasser während dieser Zeit unterhalb von Handeck weiterhin mit 5 bis 10 m³/s Gelmerseewasser verdünnt.

Die Fischfauna dürfte in den ersten beiden Tagen (8. und 9. November) am stärksten geschädigt worden sein. Trotz den sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen und der langen Dauer konnten aber regelmässig lebende Forellen in der Hasliaare beobachtet werden. Wegen zweier Baustellen erfolgten Ende November und Anfang Dezember im Raum Innertkirchen und Guttannen zwei Abfischungen in der Hasliaare. Trotz der immensen Trübstoffbelastung und der relativ langen Expositionsdauer konnten in diesen Abschnitten Bachforellen verschiedener Altersstufen nachgewiesen werden. Verglichen mit den Kontrollmessungen vor der See-Entleerung wurde teilweise sogar eine Zunahme der Anzahl Fische beobachtet – dies ist wahrscheinlich unter anderem auch auf eine Abwärtsverdriftung der Fischfauna zurückzuführen. In jedem Fall überraschten diese Ergebnisse und standen im Widerspruch zu den Einschätzungen nach dem Ansatz von *Newcombe* & *Jensen* (1996; *Limnex* 2014). Nach diesen hätte mit einem Totalausfall der Fischfauna gerechnet werden müssen.

Ab Mitte November 2014 erfolgte eine deutliche Abkühlung der Witterung, die, ausgenommen von einer kurzen Warmphase Anfang Januar 2015, bis zur Schliessung des Grundablasses im März 2015 anhielt. Entsprechend sanken die



Bild 4a. Foto der Trübstoffbelastung in der Hasliaare (Bild: Steffen Schweizer).



Bild 4b. Ausfluss aus dem Grundablass des Räterichsbodensees, November 2014 (Bild: Steffen Schweizer).



Bild 5. Foto vom leeren Stausee mit Erosionsrinnen (Bild: Stefan Schweizer).

Trübstoffwerte auf unter 1 g/l in der Region Handeck, und auf eine Dotierung mit Gelmerseewasser konnte verzichtet werden.

3.5 Ökologisches Monitoring nach der ersten Entleerung

Zwischen Frühling und Herbst 2015 erfolgte ein umfangreiches Monitoring aller relevanten gewässerökologischen Aspekte. Die ersten Ergebnisse der Baustellenabfischungen (s. o.) wurden bei zusätzlichen Abfischungen grösstenteils bestätigt und legen den Schluss nahe, dass viele Forellen die Entleerung überlebten und ein erheblicher Teil von ihnen flussabwärts verdriftet wurde. Insgesamt wiesen die gefangenen Tiere ausser einer relativ geringen Fettreserve keine auffälligen Schädigungen oder Anomalien auf. Fotodokumentationen und verschiedene Methoden zur Bestimmung der Sohleneigenschaften (Schälchli 2002, Strohmeier et al. 2005, Binderheim et al. 2007, Guthruf 2013a und 2013b) zeigten eine wesentliche Zunahme der äusseren und inneren Kolmation. Auch für die Wirbellosenfauna wurden erhebliche Reduktionen von Biomasse, Anzahl und Artenvielfalt beobachtet.

In Absprache mit den kantonalen Fachstellen erfolgte eine kontrollierte Nachspülung (10 und 20 m³/s), die zu einer gewissen Dekolmatierung und Sohlenumlagerung führte (eQcharta 2015). Unterstützt wurden diese Prozesse der Sohlenreinigung von Feinmaterial durch natürlicherweise auftretende Hochwasserereignisse, die im vergleichsweise trockenen Sommer 2015 aber tendenziell unterhalb des jährlichen Durchschnitts blieben. Im September 2015 entsprach die innere Kolmation grob dem Zustand vor November 2014. Auch die Auswertung der ersten Makrozoobenthosproben vom Herbst

2015 zeigte eine relativ schnelle Wiederbesiedlung der Invertebraten.

Die im Rahmen des intensivierten kantonalen Monitoringprogramms gefahrenen Tiefenprofile an verschiedenen Stellen im Brienersee zeigten die Dynamik der in den See eingetragenen Feststoffe. Das Material sank bereits im Bereich der Mündung der Hasliaare schnell in grössere Tiefen ab und breitete sich seeabwärts in der Tiefe aus. Drei Tage nach dem Öffnen des Grundablasses nahm an der tiefsten Stelle im See die Trübung erst unterhalb von rund 130 m kontinuierlich zu (Bild 6). Trotz Vollzirkulation des Sees im Februar 2015 fand kein vertikaler Transport der Feststoffe in die oberen Wasserschichten statt. Das Material war einerseits bereits am Seegrund angelangt und sedimentiert und andererseits schlicht zu schwer für einen solchen Mischungsprozess. Eine erhöhte Trübung in der photischen Zone (Region mit möglicher Primärproduktion durch pflanzliches Plankton und Algen) wurde nicht festgestellt. Auch die weiteren Parameter wie Wassertemperatur, Phyto- und Zooplanktondichte zeigten keine Auffälligkeiten. Inwieweit der z. T. über 200 m unterhalb der Wasseroberfläche liegende Seeboden und die dort ablaufenden biologischen Prozesse durch das Absinken der Schwebstoffe beeinträchtigt wurden, bleibt unklar.

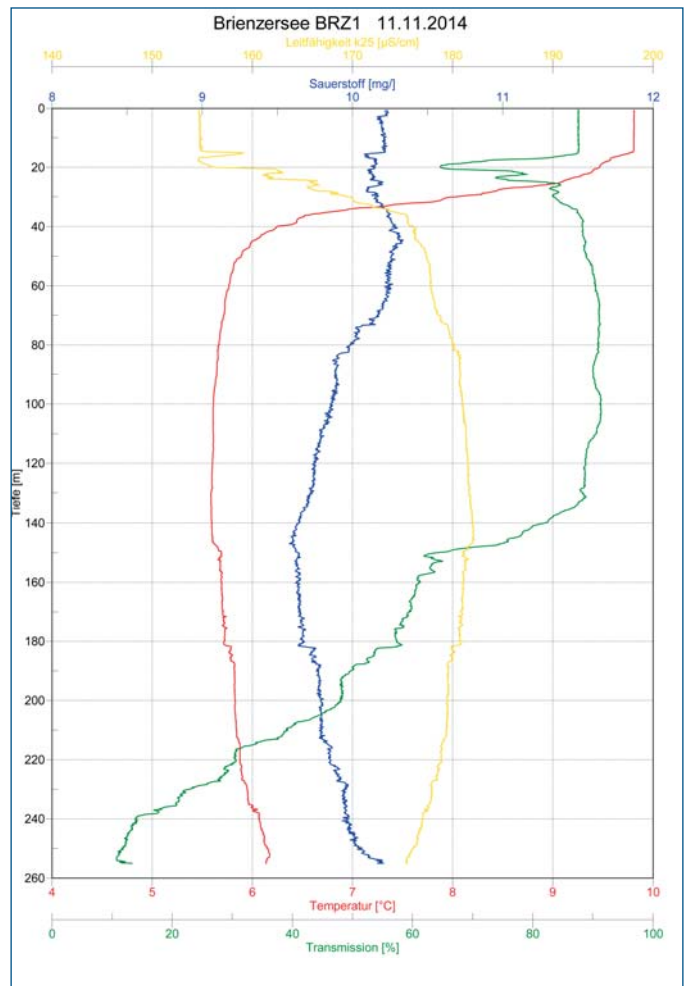


Bild 6. Tiefenprofil vom 11. November 2014 von Leitfähigkeit, Sauerstoff, Wassertemperatur und Transmission im Brienersee (in der Nähe der Einmündung der Aare in den Brienersee, aus GBL 2014). Bemerkung: Die Einlagerung der Schwebstoffe erfolgte gemäss Grafik unterhalb von 130 m Wassertiefe (vgl. grüne Linie für Transmission).

3.6 Der Murgang Spreitlauri 2015

Seit 2009 treten regelmässig Murgänge des Spreitlaurigrabens auf. Dabei werden sehr hohe Mengen an Feststoffen aus dem Einzugsgebiet des über 3000 m hohen Ritzlihorn mobilisiert und fliessen unterhalb von Guttannen in die Hasliaare (Bild 1). In den letzten sechs Jahren gelangten auf diese Weise schätzungsweise mehrere Hunderttausend Kubikmeter in die Hasliaare und in den Brienersee. Im Raum Innertkirchen hob sich die Gewässersohle der Hasliaare innerhalb von drei Jahren um rund 2 m, nachdem ihre Lage rund hundert Jahre stabil gewesen war. Diese im wörtlichen Sinn zu bezeichnenden Naturgewalten bedingten u. a. eine Verlegung der internationalen Erdgasleitung und ein umfassendes Hochwasserschutzprogramm mit Ausbaggerungen der Sohle, Dammverstärkungen und -erhöhungen sowie den Bau einer aufgeweiteten Strecke oberhalb von Innertkirchen, in der sich im Ereignisfall ein Grossteil des Geschiebes abgelagert.

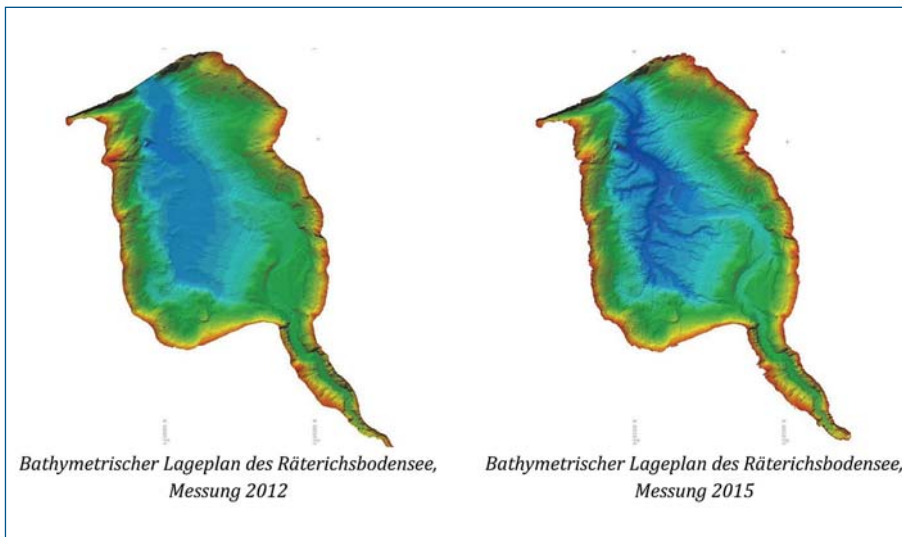


Bild 7. Bathymetrische Aufnahme vom Seegrund 2012 und 2015 (aus R.B.R. Geophysics 2015).

Auch die ökologischen Wirkungen auf die aquatischen Organismen sind bei diesen Ereignissen extrem. Dabei können sehr hohe Trübstoffkonzentrationen erreicht werden. Am 1. September 2015 fand der bislang letzte Murgang statt. Bei zwei Stichproben im Bereich Innertkirchen wurde eine Schwebstoffkonzentration von rund 800 g/l gemessen. Aufgrund des sprunghaften und für Fische unvorhersehbaren Anstiegs der Trübung, kann davon ausgegangen werden, dass höchstens einzelne Fische das Ereignis überleben konnten. Dies wurde durch anschliessende Feldbegehungen bestätigt, bei denen unzählige Fische verendet am Ufer der Hasliaare gefunden wurden. Im Rahmen einer Erfolgskontrolle für In-stream Measures (Schweizer et al. 2016) erfolgte zwei Monate nach dem Ereignis eine Abfischung der Hasliaare in Innertkirchen. Dabei konnte eine relativ schnelle Wiederbesiedlung der Fischfauna in diesem Abschnitt beobachtet werden.

3.7 Die Entleerung 2016

In Absprache mit den kantonalen Fachstellen wurden die ökologischen Schutzmassnahmen entsprechend der ersten Entleerung wiederholt bzw. den neuen Verhältnissen angepasst. Die umgesiedelten Fische und Rotalgen wurden vorerst nicht wieder in die Hasliaare zurückversetzt, die anderen Massnahmen erfolgten wie bei der ersten See-Entleerung.

Zusätzlich wurde im September 2015 eine bathymetrische Aufnahme des Seegrunds vom Räterichsbodensee durchgeführt (Bild 7). Dabei zeigte sich, dass die Erosionsrinnen, die sich während der Entleerung 2014/15 gebildet hatten, trotz anschliessendem Wiederaufstau

und Seebewirtschaftung weitestgehend unverändert geblieben waren.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Entleerung von 2014/15 konnte der Räterichsbodensee am 5. Februar 2016 bis auf 1705.1 m ü. M. über die Turbinen abgesenkt werden – also rund 4 m tiefer als bei der vorgängigen Entleerung. Die vollständige Entleerung erfolgte anschliessend am 6. Februar über den Grundablass. Ein Grossteil des vom Murgang des Spreitlauigrabens herrührenden Materials (Kap. 3.6) befand sich am 6. Februar am Rand des Gewässerbetts der Hasliaare. Die Zugabe vom Gelmersee musste daher so gewählt werden, dass sich möglichst wenig von diesem Material remobilisieren würde. Aufgrund des noch bestehenden Schluchtsystems und einer der Jahreszeit entsprechend kalten Witterung, lagen die maximalen Trübstoffkonzentrationen während der gesamten Entleerung mit kurzzeitig rund 20 g/l im Bereich Innertkirchen unvergleichbar tiefer als bei der ersten Entleerung. Um diese Werte in Relation zu natürlicherweise auftretenden Trübstoffwerten zu setzen, sei hier erwähnt, dass die höchsten Trübstoffkonzentrationen in Innertkirchen am 6. Februar während der Vorspülphase (bevor das Räterichsbodenseewasser Innertkirchen erreicht hatte) auftraten. Dieser Effekt ist höchstwahrscheinlich auf die Remobilisierung von abgelagertem Spreitlauimaterial zurückzuführen und wäre beim nächsten Frühjahrshochwasser auch natürlicherweise aufgetreten.

Die kantonalen Untersuchungen des Brienersees ergaben ein vergleichbares Bild wie bei der ersten See-Entleerung (GBL 2016).

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

4.1 Bauliche Umsetzungen

Aus baulicher Sicht konnten mit den beiden Entleerungen alle vorgesehenen Massnahmen erfolgreich umgesetzt werden. Dabei konnte der zum Teil sehr ambitionierte Zeitplan sogar noch unterschritten werden. Weiter kam es aufgrund der dynamischen Projektführung (Biasiutti & Fischlin 2013, Stamm et al. 2016) zu keinen Überschreitungen der budgetierten Kosten.

4.2 Ökologische Wirkung der Entleerungen und der Schutzmassnahmen

4.2.1 Umsetzung der Schutzmassnahmen

Bei beiden See-Entleerungen konnten die Schutzmassnahmen wie geplant umgesetzt werden (Meyer et al. 2015b). Dabei verursachten das Seeforellenleitsystem (Kap. 2, Meyer et al. 2015a) und die Ausfischungen der Hasliaare oberhalb von Handeck den mit Abstand grössten Arbeitsaufwand. Aus finanzieller Sicht dürfte die Schutzmassnahme «Verdünnung mit Gelmerseewasser» am stärksten ins Gewicht fallen, da hier das Wasser weder über die gesamte Fallhöhe noch flexibel zur Stromproduktion genutzt werden konnte.

4.3 Vergleich mit Spreitlauigraben

Die ökologischen Auswirkungen der beiden Seeentleerungen müssen auch in Relation zum Murgang des Spreitlauigrabens betrachtet werden. Bei diesem natürlichen Ereignis traten unterhalb von Innertkirchen deutlich höhere Schwebstoffkonzentrationen als während der beiden Entleerungen auf. In Zukunft wird die Klimaerwärmung zum weiteren Auftauen von Permafrostböden führen, wodurch heute noch stabile Hangflanken künftig destabilisiert werden. Daher ist eine Zunahme von solchen Murgängen wahrscheinlich. In der Regel treten Murgänge überwiegend in den wärmeren Monaten auf und die Dauer solcher Ereignisse erstreckt sich nur über einen geringen Zeitraum. Trotzdem sind die ökologischen Folgen dieser Extremsituationen auf Flora und Fauna häufig radikal (vgl. Kap. 3.6).

4.4 Schutzmassnahmen und Wiederherstellung des Zustands vor den See-Entleerungen

Unabhängig vom Spreitlaur-Murgang, zeigen die bisherigen Untersuchungen



Bild 8a (ganz oben) und 8b. Vergleich des entleerten Räterichsbodensees, oben Situation von 1974 (Bild 8a) und unten Situation von 2014 (Bild 8b). Anhand des eingekreisten Bauwerks (Vorsortierwerk für den Bau der Staumauer) lässt sich die Verfüllung mit Sediment gut erkennen.

und Erkenntnisse, dass alle Schutzmassnahmen ge-griffen haben. Damit konnten einerseits die z. T. schweren ökologischen Auswirkungen der See-Entleerungen (z. B. hinsichtlich Makrozoobenthos und Fischfauna) deutlich reduziert werden. Andererseits erlaubten die getroffenen und umgesetzten Massnahmen eine möglichst rasche Erholung der gewässerökologischen Situation in der Hasliaare.

5. Ausblick

Im Nachgang zur zweiten See-Entleerung wurde im Anschluss an eine Begehung mit den kantonalen Ämtern und den Schwel-lenkorporationen von der Leitbehörde (Fischereinspektorat des Kantons Bern) beschlossen, dass aufgrund der geringen Sedimentablagerungen der zweiten See-Entleerung auf eine erneute Nachspülung verzichtet werden kann. Seit Herbst 2016

läuft ein weiteres Monitoring der Seeforellen und des Makrozoobenthos an ausge-wählten Stellen. Eine detaillierte fischerei-lische Schadensbilanz ist noch ausstehend.

Eine Einschätzung der Sediment-füllung in anderen Stauseen ist grundsätz-lich schwierig. Die Situation im Räterichs-boden (Bild 8a und 8b) zeigt aber deutlich, dass die Verlandung von Stauseen inner-halb weniger Dekaden verlaufen kann und sich u.U. durch das Auftauen weiterer Permafrostböden in Zukunft noch weiter beschleunigen wird. Ein Patentrezept, wie mit dem hohen Geschiebeeintrag umge-gangen werden kann, gibt es sicherlich nicht. Ein Abtransport des Sediments mit Lastwagen erscheint aufgrund der riesi-gen Mengen unrealistisch, sehr teuer und unökologisch. Während der ersten See-entleerung wurden rund 500 000 m³ Sed-iment ausgespült – verglichen mit dem

Schluchtensystem (Bilder 5, 7 und 8b) «ein Tropfen auf den heissen Stein». Auch ein Ausspülen in den Vorfluter wird in vielen Fällen aus Gründen des Hochwasser- und/oder Naturschutzes nicht möglich sein. Die Möglichkeiten, einer Stauseeverlandung zu begegnen, sind vielfältig und werden zurzeit in verschiedenen Forschungspro-jekten und Fachgruppen diskutiert und behandelt.

Danksagung

An erster Stelle möchten sich die Autoren post-hum bei *Peter Baumann* bedanken, der bereits in der Anfangsphase zur Planung der ersten See-Entleerung in der Konzeptarbeit sehr viele wichtige Aspekte einbrachte. Für die aktive Mit-arbeit danken wir allen beteiligten lokalen Fi-schern, *Daniel Göz, Michael Döring* sowie den KWO-Mitarbeitern *Janick Frei, Jérémy Gerion, Andreas Funk, Magdalena Nägeli, Sonja Fah-ner, Claudia Holenstein, Stephanie von Bergen, Maria Winterberger, Jan Stamm, Ralf Grand, Andres Fankhauser, Theo Winkler, Marcel Kuhn, Gian Marco Maier, Rene Wiegenbröcker, Daniel Bürki, Kristof Reuther* und *Benjamin Berger*. Ausserdem möchten wir uns für die sehr gute Kommunikation mit dem Fischereinspektorat (insbesondere *Karin Gafner*) und dem Bernisch Kantonalen Fischerei Verband (insbesondere *Otto Naef*) bedanken. Ausserdem sei an dieser Stelle noch *Guido Konrad* und *Jakob Grünen-felder* gedankt, die uns bereits im Vorfeld der Planungen wichtige Erfahrungswerte mitgeben konnten.

Literatur

- Biasiutti, G., Fischlin, D.* (2013): Dynamische Projektführung – das Mittel zum kostengünstigen Bau von Wasserkraftwerkanlagen. «Wasser Energie Luft», 4, 265–268.
- Binderheim, E., Göggele, W.* (2007): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessge-wässer. Äusserer Aspekt. Umwelt-Vollzug Nr. 0701. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- GBL (2014): Brienersee Tiefenprofile BRZ 1, 2, 4, 5 Winter 2014/15 im Zusammenhang mit der vollständigen Entleerung des Räterichsbo-densees.
- GBL (2016): Entleerung Räterichsbodensee, Winter 2016. Monitoring Brienersee. Tiefen-profile und Fazit. Kurzbericht.
- eQcharta (2015): Erfolgskontrolle der Nachspülung Räterichsbodensee mittels Fernerkundung und Photogrammetrie. Bericht im Auftrag der KWO.
- Guthruf, J.* (2013a): Methodik zur Messung der Kolmation unter Wasser. Arbeitsbericht Aqua-tica, Auftrag: Fischereinspektorat des Kantons Bern.
- Guthruf, J.* (2013b): Einfluss der Entleerung des Räterichsboden-Stausees auf die Kolmation

- der Aaresohle. Bericht Aquatica, Auftrag: Kraftwerke Oberhasli KWO.
- Limnex* (2008): Restwasserführung in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchungen von Hasliaare und Weisser Lütschine. Beurteilung einer zukünftigen Dotierung. Bericht im Auftrag der KWO (Autor: Baumann P.).
- Limnex* (2014): KWO Räbo-Entleerung Winter 2014/15. Umweltüberwachungskonzept und Begleitmassnahmen. Bericht im Auftrag der KWO.
- Limnex* (2015): Ergebnisse der Umweltüberwachung und Begleitmassnahmen nach Abschluss der Bauarbeiten. Zwischenbericht KWO Räbo-Entleerung Winter 2014/15. Bericht im Auftrag der KWO.
- Meyer, M., Schweizer, S., Schläppi, S., Baumgartner, J., Dressler, Y., Müller, W., Flück, M., Wächter, K., Büsser, P.* (2014): Räterichsbodensee-Entleerung 2014/15. BKFV-Info, 3, 14–16.
- Meyer, M., Schweizer, S., Göz, D., Funk, A., Schläppi, S., Baumann, A., Baumgartner, J., Müller, W., Flück, M.* (2015a): Die Seeforellenweiche – ein mobiles Leitsystem für aufsteigende Wandersalmoniden. «WasserWirtschaft», 7/8, 39–43.
- Meyer, M., Schweizer, S., Schläppi, S., Fankhauser, A.* (2015): Räterichsbodensee-Entleerung 2014/15 (2015b): Eine erste Einschätzung. BKFV-Info, 2, 1–3.
- Newcombe, C.P., Jensen, J.O.T.* (1996): Channel suspended sediment and fisheries. A synthesis for a quantitative assessment of risk and impact. «N. Am. J. Fish. Man», 16/4, 693–727.
- R.B.R. Geophysics GmbH* (2015): Fächerlotpeilung am Räterichsbodensee. Bericht im Auftrag der KWO.
- Schälchli, U.* (2002): Innere Kolmation. Methoden zur Erkennung und Bewertung. Bericht im Auftrag von Fischnetz c/o EAWAG, Dübendorf.
- Schweizer, S., Meyer, M., Heuberger, N., Brechbühl, S., Ursin, M.* (2010): Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. Wichtige Unterstützung des partizipativen Begleitprozesses von KWOplus. «Wasser Energie Luft», 4, 289–300.
- Schweizer, S., Zeh Weissmann, H.* (2011): Restwassersanierung der genutzten Gewässer im Oberhasli. «Wasser Energie Luft», 1, 25–30.
- Schweizer, S., Zeh Weissmann, H., Ursin, M.* (2012a): Der Begleitgruppenprozess zu den Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. «Wasser Energie Luft», 1, 11–17.
- Schweizer, S., Meyer, M., Wagner, T., Zeh Weissmann, H.* (2012b): Gewässerökologische Aufwertungen im Rahmen der Restwassersanierung und der Ausbauprojekte an der Grimsel. «Wasser Energie Luft», 1, 30–39.
- Schweizer, S., Schmidlin, S., Tonolla, D., Büsser, P., Meyer, M., Monney, J., Schläppi, S., Wächter, K.* (2013a): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 1a: Gewässerökologische Bestandsaufnahme. «Wasser Energie Luft», 3, 191–199.
- Schweizer, S., Schmidlin, S., Tonolla, D., Büsser, P., Meyer, M., Monney, J., Schläppi, S., Schneider, M., Tuhtan, J., Wächter, K.* (2013b): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 1b: Ökologische Bewertung des Ist-Zustands anhand der 12 Indikatoren der aktuellen BAFU-Vollzugshilfe. «Wasser Energie Luft», 3, 200–207.
- Schweizer, S., Bieri, M., Tonolla, D., Monney, J., Rouge, M., Stalder, P.* (2013c): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2a: Konstruktion repräsentativer Abflussganglinien für künftige Zustände. «Wasser Energie Luft», 4, 267–274.
- Schweizer, S., Schmidlin, S., Tonolla, D., Büsser, P., Maire, A., Meyer, M., Monney, J., Schläppi, S., Schneider, M., Theiler, Q., Tuhtan, J., Wächter, K.* (2013d): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2b: Ökologische Bewertung von künftigen Zuständen. «Wasser Energie Luft», 4, 275–285.
- Schweizer, S., Grand, R., Frei, J., Schläppi, S., Meyer, M., Döring, M., Müller, W., Flück, M., Bettler, M., Herzog, B.* (2016): Instream Mesures in einer alpinen Schwallstrecke – eine erste Bilanz von der Hasliaare. «Ingenieurbiologie», 1/16, 89–93.
- Stamm, J., Kost, M., Wildi, T., Grand, R., Fankhauser, A.* (2016): Aufwertung der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1 – Realisierung von einfachen Lösungen im Kraftwerksbau. «Wasser Energie Luft», 3, 181–186.
- Strohmeier, P., Bruckner, G., Schlumprecht, H., Strätz, C.* (2005): Verschlammung und Versandung oberfränkischer Fließgewässer. Hrsg.: Bezirk Oberfranken, Bezirksfischereiverband Oberfranken, Landesfischereiverband Bayern.

Anschrift des Verfassers

Steffen Schweizer, Dr. sc. ETHZ Umwelt-naturwissenschaften, Diplom Geoökologe
 Leiter Fachstelle Ökologie KWO
 Telefon direkt +41 33 982 20 19
 Mobil +41 76 491 61 29
 sste@kwo.ch
 Kraftwerke Oberhasli AG
 Grimselstrasse 19
 CH-3862 Innertkirchen
 Tel. +41 33 982 20 11
 Fax +41 33 982 20 05
 www.grimselstrom.ch