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

**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Band:** 99 (2007)

**Heft:** 4

**Artikel:** Auswirkungen eines Speicherkraftwerkes auf das Ökosystem eines Unterliegersees am Beispiel des Brienzersees

**Autor:** Baumann, Peter / Finger, David / Müller, Rudolf

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-940156

**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:** 04.07.2025

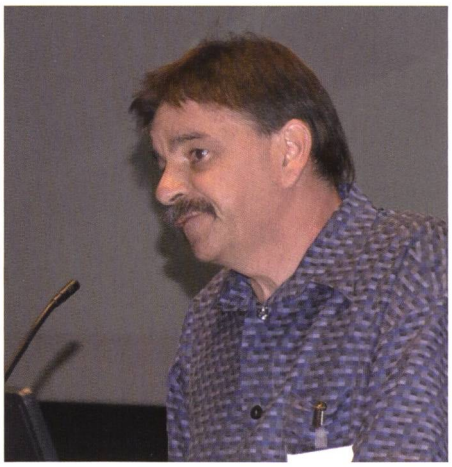
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Auswirkungen eines Speicherkraftwerkes auf das Ökosystem eines Unterliegersees am Beispiel des Brienzersees

■ *Peter Baumann, David Finger, Rudolf Müller*

**Zusammenfassung**

*Die Nutzung der Wasserkräfte im Einzugsgebiet der Hasliaare durch die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) beeinflusst auch den abiotischen Zustand und die Biologie des unterliegenden Brienzersees. Die Auswirkungen der bestehenden KWO-Anlagen sind in einem interdisziplinären Forschungsprojekt eingehend untersucht und schon grösstenteils publiziert worden. Als eines unter mehreren Ausbauprojekten planen die KWO seit einiger Zeit eine Vergrösserung des Saisonspeichers Grimselsee, um die Energieproduktion noch stärker in den Winter verlagern zu können. Auch ein solcher Ausbau würde sich, über das abgearbeitete Wasser der Zentrale Innertkirchen und die Aare, wiederum auf den Brienzersee auswirken. Diese Auswirkungen wurden von den Autoren in einer Folgestudie im Auftrag der KWO näher untersucht, wobei auch ein physikalisches Seemodell für die Simulation des Seezustandes unter Projektbedingungen zum Einsatz kam. Der nachfolgende Artikel fasst zuerst einige zugrunde liegende Erkenntnisse des Forschungsprojektes zusammen und stellt dann die bisher noch nicht veröffentlichten, wesentlichen Resultate der Folgestudie zum Einfluss des Ausbauprojektes auf den Brienzersee vor.*



***Peter Baumann, anlässlich seines Vortrages an der 96. Hauptversammlung des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes in Glarus.***

## 1. Einleitung

Die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) planen im Rahmen des Gesamt-Projektes «KWO plus» unter anderem eine Vergrösserung des Saisonspeichers Grimselsee durch die Erhöhung der beiden Staumauern um 23 m (Ursin, 2002). Durch dieses als «Speicher plus» bezeichnete Ausbauprojekt würde der Inhalt des Grimselsees bei Vollstau um rund 75% von heute 95 Mio $m^3$ auf neu 170 Mio $m^3$ zunehmen. Die im Sommer zusätzlich gespeicherte Wassermenge könnte neu im Winter abgearbeitet werden. In der Folge würde, zur heute schon bestehenden saisonalen Speicherung hinzu, nochmals ein Teil des Abflusses in der Hasliaare unterhalb der Rückgabe-Zentrale Innertkirchen I *(Bild 1)* vom Sommer- ins Winterhalbjahr verlagert. Gemessen an der langjährigen mittleren Wasserführung der Aare bei der Mündung in den Brienzersee von 35 $m^3/s$ oder umgerechnet 1100 Mio $m^3$ pro Jahr betrüge diese zusätzliche Verlagerung ca. 7%, gemessen am langjährigen mittleren Gesamtzufluss zum Brienzersee von 61,5 $m^3/s$ oder 1950 Mio $m^3$ pro Jahr noch ca. 4%. Im zweiten bedeutenden Zufluss zum Brienzersee neben der Aare, in der Lütschine *(Bild 1)*, herrschen noch die natürlichen, also nicht durch Speicherkraftwerke veränderten Abflussverhältnisse.

Wie sich die zusätzlich verlagerte Abflussmenge auf die einzelnen Monate verteilen würde, hinge stark von den Schwankungen des Wasserdargebotes und der Stromnachfrage ab. Eine allgemein gültige Prognose des geplanten Betriebsregimes ist deshalb nicht möglich, *Bild 2* zeigt aber eines der möglichen Szenarien für die mittleren monatlichen Abflüsse in der Aare bei Brienzwiler nach einer Vergrösserung des Grimselsees («Speicher plus»). Aus dieser Abbildung geht auch hervor, dass die mittleren Abflüsse zwischen den Perioden 1931–1980 und 1981–2004 nicht zuletzt als Folge der Klimaerwärmung hauptsächlich in den Sommermonaten angestiegen sind. Diese Entwicklung wird sich voraussichtlich zumindest über die nächsten Jahrzehnte fortsetzen – solange, bis die zahlreichen Gletscher im Einzugsgebiet des Brienzersees *(Bild 1)* den Höhepunkt ihres Abschmelzens überschritten haben werden. So lag etwa auch der Aare-Abfluss im extrem heissen und trockenen Sommer 2003 über dem langjährigen Mittel und damit wieder näher beim Zustand vor dem Bau der Kraftwerke, wie er durch die Periode 1921–1925 repräsentiert wird. Die Vergrösserung des Grimselsees würde diese «Rückentwicklung» unterbrechen und wieder zu ähnlich tiefen Sommerabflüssen führen, wie sie schon in den ersten Jahrzehnten des Kraftwerks-Betriebes gemessen wurden (1931–1980). Im Winter würde die bisherige Tendenz zu steigenden Abflüssen hingegen beibehalten und die Wasserführung der Aare auf einen neuen Höchststand gebracht. Durch das Ausbauprojekt «Speicher plus» würde der Aare-Abfluss allerdings sowohl im Winter als auch im Sommer deutlich weniger stark verändert als durch die Inbetriebnahme des Grimselsees als Saisonspeicher in den Jahren 1929/30 *(Bild 2)*.

## 2. Die Entwicklung des Brienzersees bis heute

Es stellt sich damit zunächst die Frage, wie der Brienzersee auf die erstmalige saisonale Verlagerung des Abflusses reagierte, welche mit der Errichtung der heutigen KWO-Anlagen in seinem Einzugsgebiet einherging. Eine Antwort darauf zu finden, wird vor allem durch die zwei folgenden Umstände erschwert:

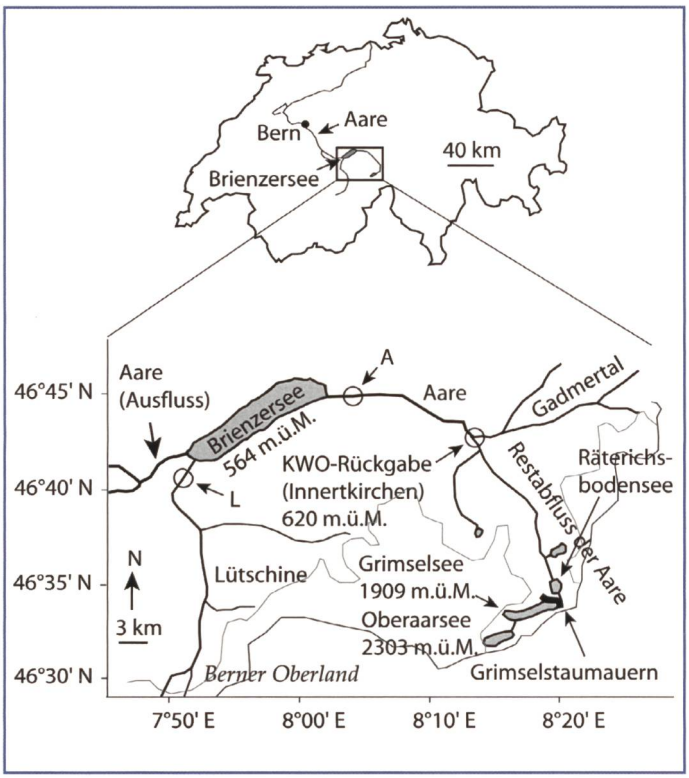



*Bild 1. Situation im Einzugsgebiet des Brienzersees mit den Speicherseen und der Zentrale Innertkirchen der KWO an der Hasliaare sowie den beiden Abfluss-Messstationen der Abteilung Landeshydrologie im Bundesamt für Umwelt (BAFU) an der Aare (A) und der Lütschine (L) vor der Mündung in den Brienzersee. Die hellgraue Linie bezeichnet die Grenze des vergletscherten Gebietes. Abbildung aus Finger (2007).*

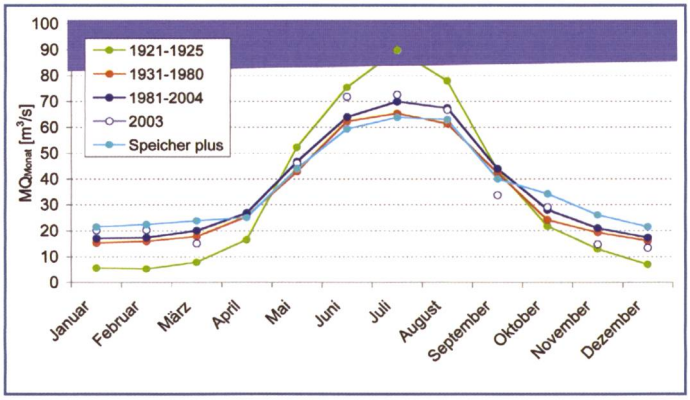



*Bild 2. Mittlere Monatsabflüsse (MQ) der Aare bei Brienzwiler in den Perioden 1921–1925 (kein Kraftwerks-Einfluss), 1931–1980 (Speicherbetrieb der KWO) und 1981–2004 (Pumpspeicherbetrieb der KWO), im Hitzejahr 2003 sowie prognostizierte Abflüsse nach dem Höherstau des Grimselsees gemäss Ausbauprojekt der KWO (Speicher plus). Abbildung aus Limnex (2006).*

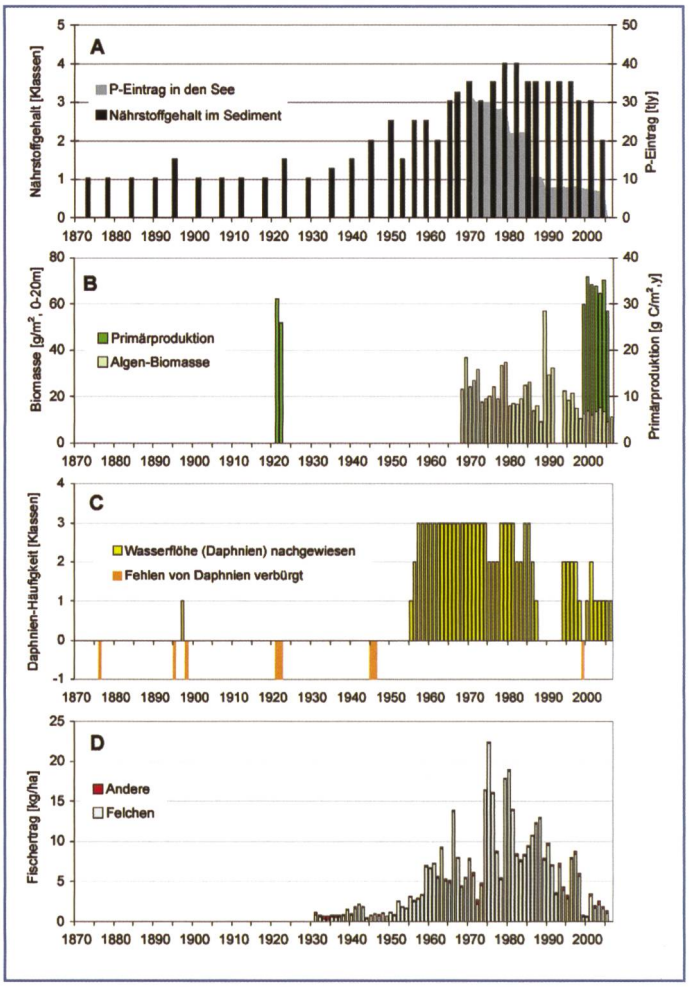



*Bild 3. Entwicklung verschiedener abiotischer und biotischer Parameter im Brienzersee seit 1870. Fehlende Säulen bezeichnen keine Nullwerte, sondern fehlende Daten. A: Eintrag an bioverfügbarem Phosphor (P) in den Brienzersee sowie Nährstoffgehalt im Seesediment, grob in Klassen eingeteilt nach den Messwerten für Phosphor und Stickstoff. B: Biomasse des Phytoplanktons in 0–20 m Tiefe und modellierte Primärproduktion unter einem m² Seefläche. C: Vorkommen von Daphnien, grob in Häufigkeitsklassen eingeteilt anhand der Individuen im Seewasser und der Dauerstadien (Ephippien) im Sediment. Negative Werte: Jahre, in denen bei ein- bis mehrmaliger Beprobung keine Daphnien nachgewiesen werden konnten. D: Jährlicher Ertrag an Felchen und anderen Fischen, bezogen auf eine Seefläche von 1 ha. Quellen: Daten des kantonalen Gewässer- und Bodenschutzlabors Bern (GBL), Fischereistatistik des Kantons Bern (geführt seit 1930), Finger et al. (2007), Müller et al. (2007a), Rellstab et al. (2007), Rellstab et al. (in Vorbereitung). Zur Einteilung der Häufigkeitsklassen in A und C siehe Limnex (2007).*

- Über den ursprünglichen Zustand des Brienzersees gibt es nur wenige zuverlässige Daten und Angaben.
- Die kraftwerksbedingten Veränderungen der Abflussverhältnisse und deren Folgewirkungen fielen zeitlich zusammen mit einer anderen Entwicklung, die nicht vom Betrieb der KWO-Anlagen abhing, im Brienzersee aber ihrerseits tiefe Spuren hinterliess: Ab ungefähr 1930 wurde der ursprünglich geringe Eintrag von Phosphor und anderen Pflanzennährstoffen in den See zunehmend grösser, weil die Bevölkerungszahl im Einzugsgebiet stark anstieg und immer mehr Siedlungsabwasser über die neu errichtete Kanalisation nicht oder ungenügend gereinigt in die Gewässer gelangte. In den 1960er-Jahren konnte diese Entwicklung gestoppt werden, und ungefähr ab 1980 ging der Phosphor-Eintrag durch den konsequenten Ausbau der Abwasser-Reinigung wieder stark zurück (Haltmeier, 2006; Müller et al., 2007a). 1980 wurde schliesslich auch die bisher jüngste Ausbaustufe der KWO in Betrieb genommen, das Umwälzwerk Grimsel II mit dem Pumpspeicherbetrieb zwischen Oberaar- und Grimselsee.

Nach dem Hochwasser-Ereignis vom Mai 1999 sind die Wasserflöhe

(Daphnien), frei im Wasser schwebende Kleinkrebse, vorübergehend aus dem Brienzersee verschwunden. Gleichzeitig sind die Fangerträge der Felchen, die sich bevorzugt von den Daphnien ernähren, im Brienzersee stark eingebrochen und haben sich seither nur teilweise wieder erholen können (*Bild 3* und *4*). Fischerei- und Umweltverbände hatten schon zuvor Befürchtungen geäussert, dass die erhöhte Trübung des Sees im Winter durch das Betriebswasser der KWO zu einer geringeren biologischen Produktivität auf allen Stufen der Nahrungskette bis hin zu den Fischen geführt haben könnte (Wüest & Zeh, 2005). All dies bewog den Kanton Bern dazu, das Ökosystem Brienzersee und besonders den Einbruch der Felchenfänge von 1999 in einem breit angelegten Forschungsprojekt durch Fachleute aus verschiedenen Bereichen untersuchen zu lassen (BVE, 2006). Die Resultate dieses interdisziplinären Forschungsprojektes sind in Fachberichten zugänglich und als wissenschaftliche Artikel publiziert (www.eawag.ch/brienzersee/).

In *Bild 3* ist die Entwicklung des Brienzersees, soweit sie sich zurückverfolgen lässt, anhand von Daten der kantonalbernischen Fischerei- und Gewässerschutz-Fachstellen sowie von Resultaten aus dem Forschungsprojekt dargestellt. Es wird deutlich, wie der Eintrag und die «Einlagerung» (im See-Sediment) der anorganischen Pflanzen-Nährstoffe Phosphor (P) und Stickstoff (N) ungefähr von 1930 bis 1980 zu- und danach bis heute wieder abgenommen hat *(Bild 3a)*. Mehr oder weniger parallel dazu entwickelten sich auch die Algen-Biomasse *(Bild 3b)*, Vorkommen und Menge der Wasserflöhe *(Bild 3c)* sowie die Fischfänge bzw. -erträge im See *(Bild 3d)*. Nach dem Sediment-Gehalt an P und N zu urteillen, ist der Brienzersee heute eher noch etwas nährstoffreicher als in seinem natürlichen Zustand vor ca. 1920. Weil Phosphor meistens der begrenzende Faktor für das Wachstum von Algen ist, wäre heute demnach auch eine etwas höhere pflanzliche und in der Folge auch tierische Produktion im See möglich. Es gibt jedoch nicht genügend ältere Vergleichsdaten, um diese Vermutung zu belegen. Immerhin deutet die Algenproduktion, die Finger (2006) mittels eines Modells auch für die Jahre 1921/22 «zurückrechnen» konnte, in dieselbe Richtung. Einen weiteren Hinweis auf eine heute immer noch leicht erhöhte Produktivität liefern darüber hinaus die Daphnien. Diese von Algen lebenden Vertreter des Zooplanktons erscheinen in der Zeit vor 1950 im Sediment überhaupt nicht und in den zerstreuten Plankton-Untersuchungen nur ausnahmsweise. Sie dürften den See früher daher nur unter sehr günstigen Umständen in grösserer Zahl besiedelt haben (Rellstab et al, 2007). Heute sind die Daphnien dagegen, wie *Bild 4* zeigt, immer noch ein fester Bestandteil des Zooplanktons. Im Vergleich zu den Jahren vor 1999 treten sie aber in geringerer Zahl und zunehmend später im Jahr auf (Kapitel 3).

Der Fangertrag von Felchen ist heute praktisch wieder auf demselben tiefen Stand wie zu Beginn der statistischen Erhebungen in den 1930er- und 1940er-Jahren. Über die effektiven Fischbestände im See geben diese Daten allerdings nur beschränkt Auskunft, da die Erträge von zahlreichen «menschlichen» Faktoren beeinflusst werden (Intensität der Befischung, Art der verwendeten Netze usw.). Zudem fehlen vergleichbare Angaben für die Zeit vor dem Einfluss der KWO-Anlagen. Es ist deshalb nicht bekannt, ob der Fischfang durch die Inbetriebnahme des Saisonspeichers Grimselsee beeinflusst worden ist. Belegt ist jedoch, dass die kleinen Felchenformen («Brienzlig») den Brienzersee sowohl zu Beginn des 20. Jahrhunderts (Surbeck, 1917) als auch in den Jahren nach dem Hochwasser-Ereignis von 1999 in viel grösserer Zahl besiedelten, als dies die geringen Fänge vermuten liessen. Die Brienzlig blieben aber in beiden Perioden so klein, dass sie durch die grobmaschigen Netze schlüpften, und es wurde infolgedessen überwiegend die grosswüchsige Form («Grossfelchen») gefangen (Kirchhofer et al., 2006; Müller et al., 2007b). Dass der gute Brienzlig-Bestand im Gegensatz zu jenem der Grossfelchen bisher nie durch künstlichen Besatz unterstützt worden ist, weist auf die immer noch erfolgreiche natürliche Fortpflanzung dieser Fische im See hin.

Der Brienzersee ist heute also, soweit belegt, wieder beinahe so unproduktiv wie vor dem Bau der Kraftwerke. Wird aus dem heutigen Seezustand mittels Modellrechnungen ein hypothetischer Zustand ohne KWO-Speicher abgeleitet («No-dam Szenario»), so weist dieser im Winter eine höhere und im Sommer dafür eine tiefere Algenproduktion auf als heute (Finger, 2006). Über das ganze Jahr betrachtet, ergeben die Modellrechnungen für den Brienzersee unter den heutigen Bedingungen eine leicht höhere Algenproduktion und gleichzeitig eine geringere Menge von Zooplankton als ohne Stauseen *(Bild 5)*. Die Vorhersage der Zooplankton-Menge ist allerdings mit grösseren Unsicherheiten behaftet, weil das Modell die unterschiedliche Zusammensetzung des Zooplanktons im natürlichen und im heutigen Seezustand *(Bild 3c)* nicht mit einrechnet.

## 3. Kritische Perioden, Ereignisse und Organismen

Der Anstieg der Produktivität im Brienzersee ab den 1950er-Jahren und ihr erneuter Rückgang seit den 1980er-Jahren war gemäss Forschungsprojekt zum grössten Teil durch den parallel verlaufenden Eintrag von Phosphor aus dem Siedlungsabwasser bedingt. Nur ein geringer Einfluss auf die Eutrophierung und anschliessende Re-Oligotrophierung des Sees wird dagegen dem Kraftwerksbetrieb zugeschrieben, hat dieser doch seit 1950 keine grossen Veränderungen im Abflussregime und damit auch im Stoffhaushalt der Aare mehr mit sich gebracht (Sägesser & Weingartner, 2005; BVE, 2006).

Das Forschungsprojekt hat aber auch aufgezeigt, dass der Kraftwerksbetrieb heute am ehesten in den Monaten März und April zu ökologisch nachteiligen Veränderungen des Sees gegenüber seinem natürlichen Zustand führt (BVE, 2006, Finger et al., 2007). In dieser Zeit bieten die zunehmende Schichtung (Stabilisierung der Wassersäule) und Sonneneinstrahlung (besseres Lichtangebot, Erwärmung) sowie der noch erhöhte Nährstoffgehalt den Algen an sich günstige Bedingungen für eine rasche Vermehrung in der obersten Wasserschicht (Epilimnion). Diese Frühjahrsentwicklung des Phytoplanktons wird heute gemäss Modellrechnungen um rund einen Monat verzögert, weil aus den KWO-Anlagen über die Aare bis ungefähr Ende April deutlich trüberes Wasser in den Brienzersee gelangt als im «No-dam Szenario» (Finger et al., 2007). Folgerichtig ist heute auch mit einem späteren Aufkommen des Zooplanktons zu rechnen, was sich wiederum auf das Nahrungsangebot für die Felchen auswirkt (Kirchhofer et al., 2006). Von den zwei Felchenformen des Sees (Kapitel 2) sind die kleinen Brienzlig dabei besonders anfällig, weil ihre Juvenilentwicklung schon in der nahrungsarmen Winterzeit beginnt und sie zudem stärker auf das Zooplankton als Futter fixiert sind. Von den älteren Felchen, vom Brienzlig etwa ab Juni des zweiten Lebensjahres, werden besonders die Daphnien als Nahrungsorganismen bevorzugt, sofern oder sobald sie sich ausreichend im See entwickeln (Müller & Bia, 2001; Maurer & Guthruf, 2005; Kirchhofer et al, 2006).

Ungefähr ab Mai verkehrt sich der nachteilige Kraftwerks-Einfluss dann rasch in sein Gegenteil, wenn die hohe sommer-

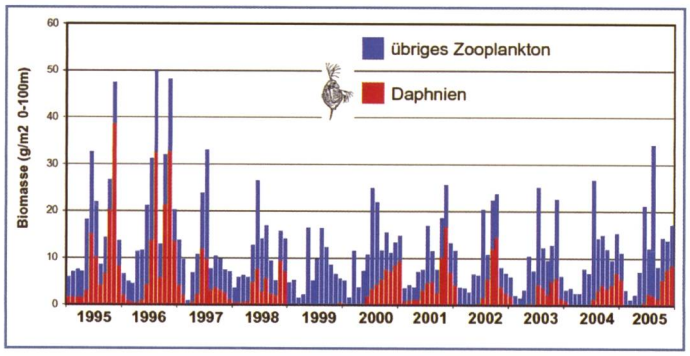



***Bild 4. Entwicklung der Zooplankton-Biomasse im Brienzersee zwischen 1995 und 2005. Dargestellt sind die Resultate der monatlichen Probenahmen durch das Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern (GBL). Grafik des GBL, Wiedergabe mit Erlaubnis.***

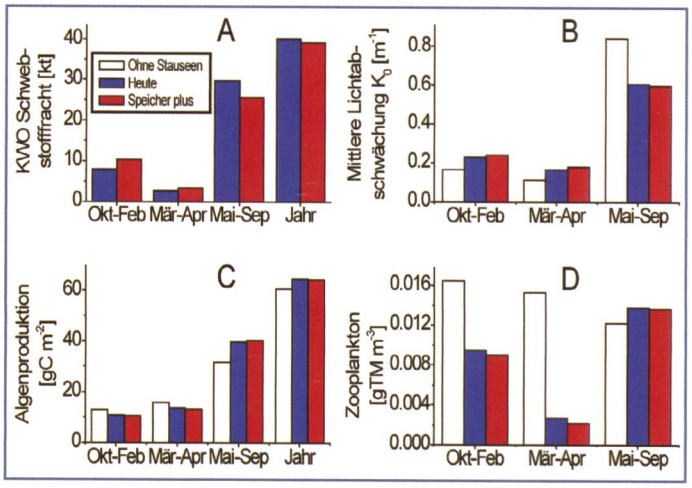



***Bild 5. Simulierte abiotische (oben) und biotische (unten) Parameter im Brienzersee zu verschiedenen Jahreszeiten unter angenähert natürlichen Bedingungen (ohne Stauseen), im heutigen Zustand sowie mit zusätzlichem Höherstau des Grimselsees gemäss Ausbauprojekt der KWO (Speicher plus). In den beiden linken Diagrammen ist zusätzlich die Jahressumme der Schwebstofffracht bzw. der Algenproduktion aufgetragen. A: Nur Fracht aus den KWO-Anlagen (ohne Rest-Einzugsgebiet der Aare und Lütschine), Werte in 1000t (kt). B: Vertikaler Extinktionskoeffizient K0 als Mass für die Lichtabschwächung. C: Assimilation von Kohlenstoff (C) unter einem m² Seefläche als Mass für die Algenproduktion. D: Trockengewicht bzw. –masse (TM) des Zooplanktons, gemittelt über die obersten 100 m des Sees. Aus einer Darstellung von Finger (2007), leicht verändert.***

liche Schwebstoff-Fracht der Aare durch den Rückhalt in den Speicherseen vermindert wird. In der Folge bleiben während des Sommers sowohl die Algenproduktion als auch die Menge des Zooplanktons über den Werten des unbeeinflussten Sees *(Bild 5)*. Dadurch, hauptsächlich aber dank der noch vorhandenen Daphnien, steht den Felchen von Juni bis Oktober heute nach wie vor etwas mehr und hochwertigere Nahrung zur Verfügung, als dies natürlicherweise der Fall wäre. Im Winter wird der See in seinem heutigen Zustand dann zwar ebenfalls wieder «künstlich» getrübt, wodurch das Lichtangebot für die Algen abnimmt. Gleichzeitig ist die Algenproduktion aber auch wegen anderer ungünstiger Randbedingungen auf einem tiefen Stand (Zirkulation der Wassersäule, geringe Einstrahlung, niedrige Temperatur). Die Monate März und April sind im Jahresverlauf daher tatsächlich als kritische Periode einzustufen, während die kraftwerksbedingten Veränderungen der unbelebten (abiotischen) und der biologischen Merkmale in den übrigen Jahreszeiten geringer sind (Limnex, 2006).

In seinem heutigen, wieder unproduktiven Zustand dürfte der Brienzersee ausserdem anfälliger sein auf zusätzliche Störungen als während der Periode erhöhter Produktivität, die ungefähr von 1960 bis 1990 dauerte. Eine starke äussere Einwirkung wie etwa das Hochwasser-Ereignis von 1999 konnte die labile Nahrungskette im See vorübergehend aus dem Gleichgewicht bringen. Die Daphnien und ihre hauptsächlichen «Räuber», die Felchen, reagierten dabei eindeutig am empfindlichsten (Rellstab et al., 2007; Müller et al., 2007b). Übriges Zooplankton und Algen (Phytoplankton) erreichten 1999 hingegen praktisch identische Biomassen wie in den Jahren davor und danach (*Bild 3* und *4*). Die Daphnien und die Felchen würden daher wohl auch bei anderen, vorübergehenden oder bleibenden Störungen zuerst in ihrem Bestand gefährdet, was bei der Beurteilung von mutmasslichen Kraftwerks-Auswirkungen zu berücksichtigen ist.

## 4. Abiotische Auswirkungen des Ausbauprojektes

Welche ökologischen Folgen eine Vergrösserung des Grimselsees (Kapitel 1) für den unterliegenden Brienzersee hätte, wurde bewusst nicht innerhalb des Forschungsprojektes untersucht. Stattdessen gaben die KWO zwei separate Folgestudien zur Abklärung dieser Frage in Auftrag. In Limnex (2006) wurden die Auswirkungen von «Speicher plus» auf massgebende abiotische Messgrössen (Parameter) des Aarewassers und des Brienzersees grob abgeschätzt. Diese Angaben sind nun durch ausführlichere Modellrechnungen von Finger (2007) nochmals überprüft und dabei im Wesentlichen bestätigt worden. Darüber hinaus konnten die vorhergesagten Werte zeitlich höher aufgelöst und erstmals die Entwicklung von wesentlichen Gliedern der biologischen Nahrungskette unter Projektbedingungen modelliert werden (Kapitel 5).

Die Vergrösserung des Grimselsees hätte bei den meisten abiotischen Parametern ähnlich gerichtete Auswirkungen auf den Brienzersee wie der erstmalige Rückhalt von Aarewasser in den bestehenden Speichern der KWO. In ihrem Ausmass wären diese abiotischen Auswirkungen von «Speicher plus» allerdings wesentlich geringer als jene des erstmaligen Aufstaues. So würde sich die Temperatur der Aare höchstens um einige Zehntelgrade ändern, was die Wärme- und Schichtungsverhältnisse des Brienzersees nicht messbar beeinflussen dürfte (Limnex, 2006). Als Folge des zusätzlichen Rückhaltes von trübem Gletscherwasser im vergrösserten Grimselsee würde der Schwebstoff-Eintrag in den Brienzersee aus den KWO-Anlagen im Sommer nochmals um ca. 4500 t abnehmen, im Winter dagegen um ca. 3400 t zunehmen *(Bild 5a)*. Die Differenz von ca. 1000 t gibt die Menge an Schwebstoffen an, die sich im Grimselsee dauerhaft absetzen (Sedimentation) und um die sich somit die gesamte Jahresfracht in den Brienzersee reduzieren würde. Selbst wenn es sich dabei um eine eher tiefe Schätzung handelt (Limnex, 2007): Gemessen an der heutigen Jahresfracht in der Aare und der Lütschine von zusammen ca. 300 000 t wäre der zusätzliche Schwebstoff-Rückhalt im höhergestauten Grimselsee vernachlässigbar gering. Nur wenige Prozent betrüge auch die anteilmässige Abnahme der Schwebstofffracht im Sommerhalbjahr, während diese Fracht von Oktober bis Februar wegen der viel geringeren absoluten Mengen gegenüber heute immerhin um ca. 20–25% zunehmen würde (Limnex, 2006; Finger, 2007). Die kritische Periode von März/April läge zwischen Winter- und

Sommerwerten, und der Schwebstoff-Eintrag in den Brienzersee wäre in dieser Übergangszeit noch um schätzungsweise 5% höher als heute.

Das Angebot an Phosphor, dem limitierenden Nährstoff für das Algenwachstum im Brienzersee, würde durch das Ausbauprojekt nur geringfügig verändert. Der für die Algen effektiv nutzbare (bioverfügbare) Phosphor-Eintrag nähme gegenüber heute im Sommer um wenige Prozent ab und im Winter um höchstens 5% zu. Diese Veränderungen wären kaum messbar, denn sie gingen im viel grösseren Anteil an mineralisch gebundenem, nicht verfügbarem Phosphor völlig unter (Müller et al., 2007a). Stärker verändern würde sich durch den Ausbau hingegen zumindest im Winter das Lichtangebot im Brienzersee: Bedingt durch die zunehmende Lichtabschwächung im trüberen Seewasser *(Bild 5b)* nähme die für das Algenwachstum noch ausreichend belichtete Schicht (euphotische Zone) von Oktober bis April maximal um ca. 2,5 m oder umgerechnet ca. 12% ab (Limnex, 2006; Finger, 2007). Im Vergleich zum erstmaligen Aufstau der KWO-Speicher erscheint diese zusätzliche Lichtabschwächung zwar gering *(Bild 5)*; Dennoch ist die erneute Reduktion des Lichtangebotes und der euphotischen Zone im Winter, speziell aber in der kritischen Periode von März/April als die erheblichste abiotische Auswirkung von «Speicher plus» auf den Brienzersee einzustufen. Auf der anderen Seite würde die Lichtabschwächung im Sommer gegenüber heute nochmals etwas vermindert *(Bild 5b)* und die euphotische Zone entsprechend ausgedehnt. Diese Veränderung bliebe aber mit ca. 2% praktisch vernachlässigbar.

Die beiden abiotischen Einflussfaktoren des Licht- und Phosphor-Angebotes sind für das Wachstum bzw. die Produktion von Algen im Epilimnion des Brienzersees von entscheidender Bedeutung (Finger et al., 2007). Beide werden einerseits durch Schwebstoff-Eintrag und -Konzentration im Epilimnion gesteuert, anderseits aber auch durch zahlreiche andere, vom Kraftwerksbetrieb unabhängige Einflüsse wie Schichtungsverhältnisse, Sonneneinstrahlung oder Abwasser-Belastung. Hinzu kommt, dass die beiden Faktoren und mit ihnen auch das Algenwachstum von den Schwebstoffen in gegensätzlicher Weise beeinflusst werden: Während das für die Algenproduktion verfügbare Lichtangebot mit zunehmender Trübung abnimmt, führt der an Schwebstoffe angelagerte und im Seewasser teils freigesetzte Phosphor gleichzeitig zu einer besseren Nährstoff-Versorgung der Algen. Welche der sich zuwiderlaufenden Wirkungen überwiegt, hängt in erster Linie davon ab, durch welchen Einflussfaktor das Algenwachstum eher begrenzt wird.

Ein vereinfachtes physikalisches Modell dieses komplexen Wirkungsgefüges ist von Finger (2006) im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelt worden. In der Folgestudie konnte es dazu verwendet werden, um die Auswirkungen von «Speicher plus» auf den Brienzersee zu simulieren. Dies erlaubt nun eine weitergehende Prognose der Projektauswirkungen, welche auch das Phyto- und Zooplankton als wichtige Glieder der biologischen Nahrungskette im See mit einschliesst. Zudem kann mit einem der verwendeten Teilmodelle auch die zeitliche Entwicklung des Planktons (Dynamik) und deren Veränderung durch das Ausbauprojekt rechnerisch nachgebildet werden.

## 5. Auswirkungen des Ausbauprojektes auf die Biologie

Ebenso wie für die abiotischen Parameter ergaben die Modellrechnungen von Finger (2007) auch für das Phyto- und Zooplankton unter den Bedingungen von «Speicher plus» nur geringe Veränderungen gegenüber heute *(Bild 5c* und *5d)*. Die Algenproduktion nähme im Sommer tendenziell nochmals leicht zu und im Winter leicht ab, was über das ganze Jahr fast unveränderte Werte ergäbe. Am stärksten wäre die Abnahme gegenüber dem heutigen Zustand in der kritischen Zeit von März/April mit durchschnittlich ca. –0,56 g C/m$^2$, was anteilmässig ca. –4% entspräche. Wenn die Produktionswerte zeitlich höher aufgelöst für jeden einzelnen Tag des Jahres berechnet werden, resultiert für die Wintermonate Januar/Februar eine noch etwas höhere anteilmässige Abnahme der Produktion zwischen –5% und maximal –9% (Finger, 2007).

Für das Zooplankton berechnet das Modell nicht die innerhalb eines bestimmten Zeitraums produzierte, sondern die zu einem bestimmten Zeitpunkt im See vorhandene Biomasse. Deshalb ist in *Bild 5* beim Zooplankton auch keine Jahressumme dargestellt wie beim Phytoplankton. Ebenfalls im Unterschied zum Phytoplankton nimmt die Biomasse des Zooplanktons sodann in allen dargestellten Jahreszeiten ab, werden für den Sommer also keine höheren Werte erwartet. Die Unterschiede bleiben jedoch auch in diesem Fall gering, und ausserdem bestehen beim Zooplankton noch zusätzliche Unsicherheiten wegen des nicht berechenbaren Anteils der Daphnien (Kapitel 2).

Bedingt durch die etwas geringere Produktion im Winter und Frühjahr, würde der Zeitpunkt der höchsten Algendichte (Maximum der Frühjahrsentwicklung) gegenüber heute nochmals um einige Tage hinausgeschoben. Im Gegensatz zum erstmaligen Aufstau der KWO-Speicher (Kapitel 3) bliebe diese Verzögerung aber gering, und das Phytoplankton würde das Maximum seiner Frühjahrsentwicklung, ähnlich wie heute, Anfang bis Mitte Mai durchlaufen. In der Folge würde auch das Zooplankton seine höchsten Dichten wohl einige Tage später, aber immer noch um Ende Mai bis Anfang Juni erreichen. Dabei handelt es sich um durchschnittliche Zeitangaben, von denen die einzelnen Jahre beträchtlich abweichen können (Finger, 2006). Aus den bestehenden, einmal monatlich erhobenen Daten zur Biomasse des Zooplanktons *(Bild 4)* und Phytoplanktons *(Bild 6)* ist der Zeitpunkt der effektiven Maximalwerte nicht genau zu bestimmen. Daher stellen die Resultate der Modellrechnungen eine notwendige und sinnvolle Ergänzung dar, welche sowohl die bestehenden Messreihen «aufbessert», als auch die komplexen Zusammenhänge innerhalb des Ökosystems Brienzersee überhaupt erst fassbar macht. Gleichzeitig sind aber auch die Grenzen des Modells zu beachten, bleiben darin doch zwangsläufig gewisse Einflussfaktoren und besonders auch einige wesentliche Glieder der seeinternen Nahrungskette unberücksichtigt (Finger, 2006).

Die verbleibende, gewässerökologisch und fischereiwirtschaftlich zentrale Frage bei der Beurteilung des Ausbauprojektes lautet: Wie würden sich unter den Bedingungen eines höhergestauten Grimselsees die Daphnien und deren hauptsächliche Räuber, die Felchen, im Brienzersee weiterentwickeln, nachdem ihre Bestände durch die Re-Oligotrophierung des Sees heute schon vermindert und auf zusätzliche Störungen wie das Hochwasser von 1999 sehr anfällig geworden sind? Diese Frage wird in Limnex (2007) ausführlich behandelt.

Nach den schon besprochenen, in *Bild 5c* und *5d* grafisch dargestellten Resultaten der Modellrechnungen würde «Speicher plus» beim Zooplankton und bei seiner Hauptnahrung, dem Phytoplankton, im Brienzersee nur zu kleinen Veränderungen in der Menge bzw. Produktion und ebenso kleinen Verzögerungen der Frühjahrsentwicklung führen. Dies dürfte grundsätzlich auch für die Daphnien gel-

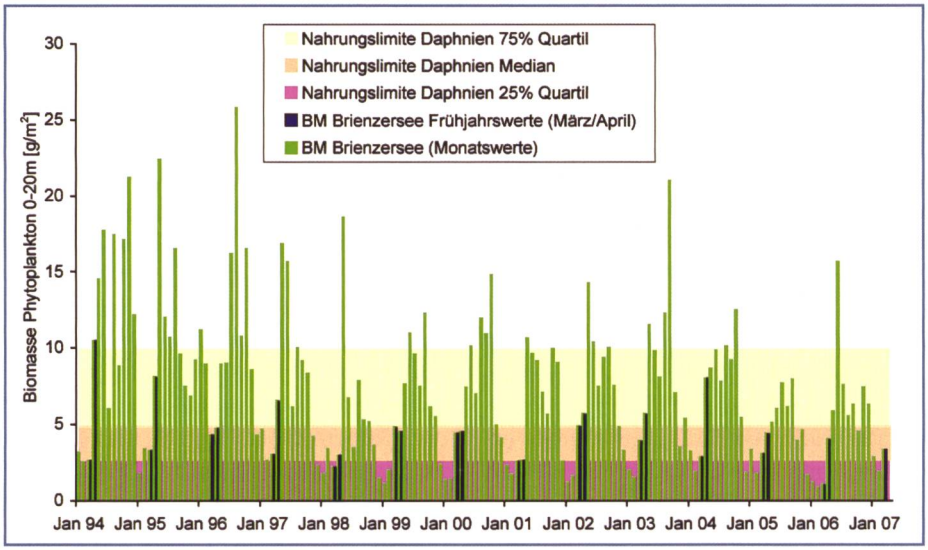



***Bild 6. Entwicklung der Phytoplankton-Biomasse im Brienzersee von 0–20 m Tiefe anhand der monatlichen Aufnahmen in den Jahren 1994–2006. Die Säulen der Monate März und April sind jeweils dunkel hervorgehoben. Quelle: Daten des kantonalen Gewässer- und Bodenschutzlabors Bern. Die rot bis gelb hinterlegten Flächen geben die Wahrscheinlichkeit an, dass der für Daphnien notwendige, minimale Nahrungsbedarf mit den jeweiligen Algenmengen schon erreicht oder überschritten ist. Die oberen Begrenzungen dieser Flächen entsprechen einer Wahrscheinlichkeit von 25% (unteres Quartil), 50% (Median) und 75% (oberes Quartil). Einzelheiten siehe Text.***

ten, welche heute in den meisten Jahren ca. 30% der Zooplankton-Biomasse ausmachen *(Bild 4)*. Wie Rellstab et al. (2007) zeigen konnten, haben sich die Daphnien im Brienzersee von den 1990er- zu den 2000er-Jahren nicht nur in geringerer Dichte, sondern tendenziell auch später im Jahresverlauf entwickelt. Diese Veränderungen waren offensichtlich nicht durch den (unveränderten) Kraftwerksbetrieb, sondern in erster Linie durch den verminderten Nährstoff-Eintrag und die damit verbundene, geringere Produktivität des Sees bedingt. Die Auswirkungen dieser Re-Oligotrophierung auf der einen und des Kraftwerksbetriebes auf der anderen Seite können sich demnach gegenseitig verstärken (Finger, 2006). Der damit verbundene Druck auf Daphnien und Felchen («Stress») würde durch das Ausbauprojekt «Grimsel plus» nochmals etwas erhöht. Die gemessen am heutigen Zustand stärksten, absolut betrachtet aber immer noch geringen Veränderungen der abiotischen und biotischen Parameter würden zudem in den Monaten März/April auftreten, wenn der See heute schon am ehesten als anfällig auf zusätzliche Störungen eingeschätzt wird (Kapitel 3).

Zieht man einige Literaturangaben zum minimalen Nahrungsbedarf von Daphnien aus verschiedenen nährstoffarmen (oligotrophen) Seen und aus Laborexperimenten zusammen, so können daraus die in *Bild 6* dargestellten Nahrungslimiten abgeleitet werden (ausgedrückt als Algen-Biomassen). Weil die zugrunde liegenden sechs Datensätze um bis zu eine Grössenordnung voneinander abweichen, sind diese Limiten nicht als feste Werte, sondern als Annäherungen aufzufassen. Sie geben eine ungefähre Wahrscheinlichkeit an, dass der für Daphnien notwendige, minimale Nahrungsbedarf mit den jeweiligen Algenmengen schon erreicht oder überschritten ist. Die Überlagerung mit den seit 1994 im Brienzersee gemessenen Phytoplankton-Biomassen macht deutlich, dass seit 1999 im Winter schlechte und im März/April höchstens mässige Voraussetzungen für das Aufkommen der Daphnien herrschen. Ab Mai oder spätestens Juni bestehen dagegen in den meisten Jahren gute Aussichten auf ein ausreichendes Nahrungsangebot *(Bild 6)*. Dies entspricht weitgehend dem effektiv festgestellten Verlauf der Daphnien *(Bild 4)* und bestätigt damit einmal mehr, dass deren Auftreten und Menge hauptsächlich vom Nahrungsangebot gesteuert werden. Eine Ausnahme stellt das Jahr 1999 dar, als sich die Daphnien infolge eines Hochwasser-Ereignisses trotz ausreichender Nahrung nicht entwickeln konnten (Rellstab et al., 2007).

Mit dem von Finger (2007) modellierten Rückgang der Algenproduktion von Januar bis April unter den Bedingungen von «Speicher plus» *(Bild 5)* würde auch das Nahrungsangebot für Daphnien nochmals um einige Prozent vermindert. Weil die Chancen für das Aufkommen und die effektiv festgestellten Mengen von Daphnien in dieser Zeit aber heute schon stark eingeschränkt sind, würde sich die Ausgangslage für die anschliessende Frühjahrsentwicklung des Planktons nicht grundsätzlich verändern. Es ist vielmehr zu erwarten, dass sich Phyto- und Zooplankton einschliesslich der Daphnien ab Mai in ähnlicher Weise entwickeln würden wie heute. Der Zeitpunkt ihrer maximalen Biomassen würde zwar im langjährigen Durchschnitt nochmals um einige Tage hinausgeschoben. Auf der anderen Seite würde die Algenproduktion in den Sommermonaten tendenziell leicht zunehmen, was auch ein etwas besseres Nahrungsangebot für Daphnien mit sich brächte. Damit würde die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Daphnien in dieser Zeit etwas grösser *(Bild 6)*.

Die einjährigen und älteren Felchen sind heute vor allem in ihrer Haupt-Wachstumsphase von Mai bis Oktober auf Daphnien als Nahrung angewiesen (Kapitel 3). In diesen Monaten würde der Höherstau des Grimselsees nur sehr geringe, und wenn dann eher vorteilhafte, Veränderungen des Nahrungsangebotes mit sich bringen. Gleichzeitig ginge auch die Lichtabschwächung und damit die Trübung des Seewassers gegenüber heute nochmals leicht zurück *(Bild 5b)*, was den Nahrungserwerb der visuell jagenden Felchen aber kaum erleichtern könnte (Kirchhofer et al., 2006; Müller et al., 2007b). In den Winter- und Frühjahrs-Monaten, wenn das Angebot an Daphnien heute schon verschwindend gering ist, stellen die älteren Felchen entweder auf andere Futterorganismen um (übriges Zooplankton, Bodenfauna) oder sie hungern. Larven und Jungfische der Felchen, die noch keine Daphnien fressen, sind ebenfalls auf ein ausreichendes Angebot an übrigen Plankton-Organismen angewiesen (Rellstab, 1999). Am ehesten kritisch ist für alle Stadien das Frühjahr, wenn die zunehmende Wassertemperatur zu schnellerem Wachstum und erhöhtem Nahrungsbedarf führt. In dieser Zeit ginge die Gesamtmenge an Zooplankton (noch ohne Daphnien) unter den Bedingungen von «Speicher plus» gegenüber heute um wenige Prozent zurück. Dadurch würde die Nahrung für jene Felchenformen und -stadien nochmals etwas knapper, welche nicht auf andere Organismen ausweichen, also hauptsächlich für ausgewachsene Brienzlig und Larven. In gleicher Weise, aber in noch viel stärkerem Ausmass hat sich gemäss Modellrechnungen das Plankton-Angebot im Frühjahr auch durch den erstmaligen Aufstau der KWO-

Speicher vermindert (*Bild 5c*). Dennoch werden im Brienzersee nach wie vor recht hohe Brienzlig-Bestände und eine funktionierende natürliche Fortpflanzung der Felchen festgestellt. Es ist unwahrscheinlich, dass gleichgerichtete, aber viel geringere Veränderungen des Nahrungsangebotes daran etwas ändern würden. Gestützt wird dies nicht zuletzt durch die Tatsache, dass der Brienzersee schon in seinem natürlichen Zustand einen grossen, sich selbst erhaltenden Brienzlig-Bestand aufwies. Auch damals war das Nahrungsangebot für die Felchen aber zumindest in gewissen Zeiten schlechter als heute, weil die Daphnien fast vollständig fehlten (Kapitel 2).

## 6. Schlussfolgerungen

Es ist nicht zu erwarten, dass eine Vergrösserung des Grimselsees durch Höherstau, wie ihn das Ausbauprojekt «Speicher plus» der KWO vorsieht, zu wesentlichen Veränderungen bei den Plankton- und Fischbeständen im unterliegenden Brienzersee führen würde. Es gibt auch keine Anhaltspunkte dafür, dass die Daphnien als wichtigste Nahrungsorganismen für die Felchen wegen «Speicher plus» wieder fast völlig ausbleiben könnten, wie dies wohl schon im unbeeinflussten Seezustand der Fall war. Deshalb ist auch nicht zu befürchten, dass allein durch dieses Projekt die heute schon geringen Fischerträge des Brienzersees noch weiter sinken würden.

Ebenso wie im heutigen Zustand werden die Auswirkungen des Kraftwerksbetriebes auch in Zukunft von verschiedenen anderen, natürlichen und anthropogen bedingten Einflüssen überlagert:

- Die natürlichen, vorwiegend witterungsabhängigen Schwankungen des Seezustandes werden wesentlich grösser sein als allfällige gerichtete, durch Speicher plus» verursachte Veränderungen.
- Spezielle Ereignisse («Störungen») wie das Hochwasser von 1999 können die Nahrungskette des Sees, besonders aber die anfälligen Populationen von Daphnien und Felchen, mit oder ohne «Speicher plus» jederzeit wieder aus dem Gleichgewicht bringen.
- Eine weitergehende Re-Oligotrophierung des Brienzersees, beispielsweise durch zusätzliche Verminderung der Phosphor-Einträge aus Siedlungsabwasser, würde die Projektauswirkungen tendenziell verstärken.
- Durch die allgemeine klimatische Erwärmung. Weitere Folgewirkungen der Erwärmung sind möglich, aufgrund ihrer Komplexität vorläufig aber nicht genauer vorherzusagen (Rellstab et al., 1999; Blenckner, 2001).

Literatur


*Blenckner, T.* (2001): Climate related impacts on a lake. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations 674 from the Faculty of Science and Technology, Uppsala.

*BVE* (2006): Brienzersee: ein Ökosystem unter der Lupe. Resultate des Forschungsprojektes zum Rückgang des Planktons und der Felchenerträge. Informationsbroschüre, herausgegeben von der kantonalen Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion, Bern.

*Finger, D.* (2006): Effects of hydropower operation and re-oligotrophication on internal processes in Lake Brienz. Dissertat. Nr. 16827, ETH Zürich (www.eawag.ch/kuerze/personen/homepages/fingerda/index).

*Finger, D.* (2007): Auswirkungen des Grimselsee-Ausbaus auf den Schwebstoffhaushalt und auf die Primärproduktion des Brienzersees. Bericht im Auftrag der KWO, Innertkirchen.

*Finger, D., Bossard, P., Schmid, M., Jaun, L., Müller, B., Steiner, D., Schäffer, E., Zeh, M., Wüest, A.* (2007): Effects of alpine hydropower operations on primary production in a downstream lake. Aquat. Sci. 69(2): 240–256 (www.eawag.ch/kuerze/personen/homepages/fingerda/index).

*Haltmeier, Th.* (2006): Eintrag von gelöstem Phosphor. Schlussbericht zu Teilprojekt B des Forschungsprojektes, Bonnard & Gardel AG, Bern.

*Kirchhofer, A., Breitenstein, M., Müller, R.* (2006): Veränderungen im Ökosystem Brienzersee: Beziehungsnetz Fische – Zooplankton. Schlussbericht zu Teilprojekt E des Forschungsprojektes, WFN, Gümmenen, und EAWAG, Kastanienbaum.

*Limnex* (2006): Auswirkungen des Projektes «KWO plus». Zusatzstudie zum UVB «Vergrösserung Grimselsee». Bericht im Auftrag der KWO, Innertkirchen.

*Limnex* (2007): Auswirkungen eines höher gestauten Grimselsees («Speicher plus») auf das Ökosystem des unterliegenden Brienzersees. Bericht im Auftrag der KWO, Innertkirchen.

*Livingstone, D.* (2003): Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. Climatic Change 57: 205–225.

*Maurer, V., Guthruf, K.* (2005): Brienzerseefelchen – Magenanalysen. Schlussauswertung Routineprogramm. Bericht von HYDRA und Aquatica GmbH im Auftrag des kantonalen Fischereiinspektorates, Bern.

*Müller, B., Finger, D., Sturm, M., Prasuhn, V., Haltmeier, Th., Bossard, P., Hoyle, C., Wüest, A.* (2007a): Present and past bioavailable phosphorus budget in the ultra-oligotrophic Lake Brienz. Aquat. Sci. 69(2): 227–239.

*Müller, R., Breitenstein, M., Bia, M.M., Rellstab, Ch., Kirchhofer, A.* (2007b): Bottom-up control of whitefish population in ultra-oligotrophic Lake Brienz. Aquat. Sci. 69(2): 271–288.

*Müller, R., Bia, M.M.* (2001): Fische auf Diät: Die Kleinfelchen im Vierwaldstättersee. Auswirkungen der Re-Oligotrophierung auf die Population der Kleinfelchen und Konsequenzen für die Bewirtschaftung. Mitteilungen zur Fischerei Nr. 68, herausgegeben vom BUWAL, Bern: 39–50.

*Rellstab, Ch.* (1999): Einfluss der Nahrungskonzentation auf Wachstum und Mortalität der Kleinfelchenlarven (Coregonus sp.) im reoligotrophierten Vierwaldstättersee. Diplomarbeit an der EAWAG, Kastanienbaum.

*Rellstab, Ch., Maurer, V., Zeh, M., Bürgi, H.R., Spaak, P.* (2007): Temporary collapse of the Daphnia population in turbid and ultra-oligotrophic Lake Brienz. Aquat. Sci 69(2): 257–270.

*Sägesser, M., Weingartner, R.* (2005): Veränderung der Hydrologie der Aare. Modellierung des natürlichen Abflusses der Aare, Pegel Brienzwiler, von 1921 bis 2004. Schlussbericht zu Teilprojekt A des Forschungsprojektes, geographisches Institut der Universität Bern.

*Surbeck, G.* (1917): Der Brienzlig (Coregonus exiguus Klunz. var. albellus Fatio) des Brienzersees. Herausgegeben von der Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei, Bern. H.Kunz, Pfäffikon.

*Ursin, M.* (2002): «KWO plus»: Mehrung der Wasserkräfte an der Grimsel. Tec21, Band 36: 13–17.

*Wüest, A., Zeh, M.* (2005): Dem Felchenfangrückgang im Brienzersee auf der Spur. Bulletin SEV/VSE 10/05: 1–4.



Anschrift der Verfasser

*Peter Baumann*
Limnex AG, Schaffhauserstrasse 343
CH-8050 Zürich, Tel. +41 44 313 13 00
peter.baumann@limnex.ch

Dr. *David Finger*
10 rue Viollier, CH-1207 Genève
Mob. +41 78 751 22 46, fingerd@gmx.net

Dr. *Rudolf Müller*
LIMNOS Fischuntersuchungen, Bärhalten 1
CH-6048 Horw, Tel. +41 41 340 32 80
rudolf.mueller@swissonline.ch