



Brienzersee: Ein Ökosystem unter der Lupe



**Resultate des Forschungsprojekts zum Rückgang
des Planktons und der Felchenerträge**



Prof. Alfred Wüest, Leiter der begleitenden Expertengruppe

Erfolgreicher Indizienprozess am Brienzersee

1999 fingen die Berufsfischer im Brienzersee plötzlich und unerwartet kaum noch Felchen. Der jährliche Ertrag brach auf weniger als 2 Tonnen ein, nachdem in den späten 1970er-Jahren noch 40 Tonnen gefangen wurden. Gleichzeitig stellten die Fachleute des Gewässerschutzamtes fest, dass auch die Wasserflöhe (Daphnien) verschwunden waren, von welchen sich die Felchen hauptsächlich ernähren. Zwar gab es verschiedene Vermutungen über mögliche Hintergründe, jedoch kaum überzeugende Beweise. Da keine „Zeugen“ zu vernehmen waren und der Brienzersee sowieso die „Aussage verweigert“, entschied sich der Kanton Bern für einen wissenschaftlichen „Indizienprozess“ – ein nachträgliches Erforschen des „Tathergangs“ in diesem einzigartigen Ökosystem.

Im Auftrag des Kantons haben Fachleute verschiedener Institute im See und in seinem Einzugsgebiet während über zwei Jahren tausende von Daten erhoben, ausgewertet und zu einem in sich konsistenten Bild zusammengefügt. Diese aufwändigen Untersuchungen haben Resultate geliefert, mit denen sich die Vorgänge von 1999 im Brienzersee überzeugend rekonstruieren lassen. Wie immer in der Naturwissenschaft, weisen Erhebungen in der Umwelt natürliche Schwankungen auf: So haben wir zum Beispiel 2003 völlig ungeplant den Jahrtausendsommer und 2005 ein gewaltiges Hochwasser erfasst. Viele Zahlen dieser Broschüre wei-

sen deshalb übliche Ungenauigkeiten von gegen 20 Prozent auf – das ist unvermeidlich und liegt in der Natur der Sache.

Bei allen Grenzen, welche die Natur der Wissenschaft setzt – die entscheidenden Ergebnisse der Studie sind hieb- und stichfest. So wissen wir, dass sich der Brienzersee heute natürlicherweise in einem äusserst nährstoffarmen Zustand befindet, dessen geringe Algen- und damit Zooplankton-Produktion auch künftig keine grösseren Fischfangerträge erlaubt. Diese waren in den 1970er-Jahren nur deshalb so hoch, weil das Abwasser damals weitgehend ungeklärt in den See gelangte. Nachgewiesen ist jetzt auch, dass der See vor dem Bau der Stauseen im Sommer deutlich trüber und im Winter etwas klarer war. Ohne die Wasserkraftnutzung wären bei gleicher Nährstoffversorgung weder ein vermehrtes Algenwachstum noch ein höherer Fischertrag zu erwarten.

Die Forschungsarbeit am Brienzersee stiess auf grosses Interesse, und die Identifikation der Gesprächspartner mit dem See und dessen Einzugsgebiet wirkte sehr motivierend. Auch das spürbare politische Spannungsfeld belebte viele der wissenschaftlichen Diskussionen mit „konkreter Realität“. Allen, die sich für das äusserst interessante Forschungsprojekt engagiert haben, möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Antworten auf häufige Fragen

Die im Lauf der Jahre unterschiedliche Trübung des Brienzersees wirft immer wieder Fragen nach den möglichen Gründen auf. Auch der Zusammenhang zwischen der Brienzersee-Studie, den Ausbauplänen der Kraftwerke Oberhasli AG und der laufenden Restwassersanierung ist häufig unklar. Weil die vorliegende Broschüre nur auf die Resultate der aktuellen Untersuchungen eingeht, hat das GSA die

Antworten auf häufige Fragen zusätzlich in einem separaten Dokument zusammengefasst. Die entsprechenden Erklärungen sind auf der Homepage des Amtes zu finden:

www.gsa.bve.be.ch

> [Gewässerqualität](#) > [Seen](#)

> [Berichte](#) > [Brienzersee: Antworten auf häufige Fragen](#)

Der Brienersee im Überblick



Wie die meisten Seen am Alpenrand ist der Brienersee ein nährstoffarmes Gewässer, das stark von den unproduktiven Gebirgszonen in seinem Einzugsgebiet geprägt wird.

Seiten 4 / 5

Die Fangerträge bleiben bescheiden



Die Fischer am Brienersee müssen sich langfristig auf geringe Fänge einstellen. Äusserst tiefe Nährstoffgehalte limitieren das Futterangebot für Fische und lassen in Zukunft jährliche Fangerträge von nur 2 bis 3 Kilo pro Hektare Seefläche erwarten.

Seiten 6 / 9

Titelbild: Entnahme einer Wasserprobe im Brienersee mit der Schöpfflasche. Die Wasserflöhe oder Daphnien (links) sind die Nahrungsgrundlage der Felchen.

Wenig Futter für die Daphnien



Die mangelnde Futterbasis, tiefe Wassertemperaturen und der ausserordentliche Abfluss während des Hochwassers im Frühling waren 1999 die Hauptgründe für den Zusammenbruch der Daphnienpopulation im Brienersee. Ein ähnlicher Einbruch ist im Frühjahr auch künftig wieder möglich.

Seiten 10 / 13

Stark verringertes Nährstoffangebot

Das geringe Nährstoffangebot und die Lichtabschwächung durch die eingebrachten Trübstoffe lassen im Brienersee auch künftig nur ein geringes Algenwachstum erwarten. Die Populationen der Daphnien und Felchen im See werden daher nicht mehr die Bestandesgrössen der späten 1970er-Jahre erreichen.



Seiten 14 / 17

Die vorliegende Publikation erscheint auch als Sonderausgabe 2/2006 des GSA-Informationsbulletins.

Geringer Einfluss der Stauseen



Die Stauseen der Kraftwerke Oberhasli im Grimselgebiet verändern die Wasserführung der Aare und halten Geschiebe sowie Schwebstoffe zurück. Dadurch wird der Partikeleintrag in den Brienersee verringert und zeitlich verlagert, was sich auf das Licht im See auswirkt. Doch der Einfluss auf die jährliche Algenproduktion ist gering.

Seiten 18 / 21

Die Folgerungen der Behörden



Weil heute wieder weniger Nährstoffe in den Brienersee gelangen, haben die Felchenerträge stark abgenommen. Der Kanton Bern lehnt Abstriche beim technischen Gewässerschutz zur Erhöhung der Fischerträge jedoch klar ab. Aus gewässerökologischer Sicht drängen sich auch keine Massnahmen zur Reduktion der winterlichen Seetrübung auf.

Seite 22

Die wissenschaftlichen Grundlagen

Seite 23

Impressum und Links

Seite 24

Karges Leben in einem typischen Alpenrandsee



Seeausfluss der Aare bei Interlaken. Rechts mündet die Lütschine in den Brienzersee.

Wie die meisten Seen am Alpenrand ist der Brienzersee ein nährstoffarmes Gewässer, das stark von den unproduktiven Gebirgszonen in seinem Einzugsgebiet geprägt wird. Fels und Gletscher machen mehr als die Hälfte der Gesamtfläche aus. Bedingt durch die hohe Erosion transportieren die Hauptzuflüsse Aare und Lütschine grosse Mengen an mineralischen Partikeln in den See. Diese Trübstoffe sind der Grund für das von Frühling bis Herbst milchige, türkisfarbene Erscheinungsbild des Brienzersees.

Der Brienzersee liegt 564 Meter über Meer in einer rund 2,5 Kilometer breiten Talmulde, die der eiszeitliche Aaregletscher geschaffen hat. Als einer der grössten schweizerischen Alpenrandseen ist er in der Fliessrichtung der Aare beidseitig von bis zu 2300 Meter hohen Bergketten umgeben, die auch im Uferbereich steil abfallen, so dass es kaum Flachwasserzonen gibt.

Stark vergletschertes Einzugsgebiet

Sein mehrheitlich alpines Einzugsgebiet erstreckt sich über 1134 Quadratkilometer und ist damit fast 38 Mal so gross wie der See. Wichtigste Zuflüsse sind die Hasliare und die bei Bönigen in den Brienzersee mündende Lütschine. Entsprechend dem gebirgigen Charakter ist die Gegend nur dünn besiedelt, und der Anteil der Siedlungsfläche beschränkt sich auf 2 Prozent. Unproduktive Zonen, die hier grösstenteils aus Fels und Gletscher bestehen, machen 56 Prozent des Einzugsgebiets aus. Die restlichen 42 Prozent entfallen je zur Hälfte auf Wald und landwirtschaftliche Nutzflächen, welche

vor allem aus Alpweiden bestehen.

Die extensive Nutzung hat zur Folge, dass dem See nur wenig Nährstoffe zufließen, so dass die Algenproduktion äusserst gering ausfällt. Weil das pflanzliche Plankton die Basis der Nahrungspyramide bildet, bleiben auch die Entwicklung des Zooplanktons und damit die Fischbestände begrenzt. Der Brienzersee ist also von Natur aus ein äusserst nährstoffarmes, unproduktives und daher wenig ertragreiches Gewässer.

Der tiefste aller Berner Seen

Mit über 2000 Litern pro Quadratmeter liegt der mittlere Jahresniederschlag im Einzugsgebiet rund 40 Prozent über dem gesamtschweizerischen Durchschnitt, was für die Hochalpen typisch ist. Davon verdunsten etwa 340 Liter und 1720 Liter fließen in den Brienzersee ab. Dieser hat ein Fassungsvermögen von 5,15 km³ und speichert damit gut viermal soviel Wasser wie der flächenmässig um fast ein Drittel grössere Bielersee. Wegen seiner Tiefe und Lage wird der Brienzersee nicht jeden Winter vollständig durchmischt.

Wie bei Bieler- und Thunersee wird auch der Wasserstand des Brienzersees von der zentralen Leitstelle des kantonalen Wasserwirtschaftsamtes in Bern reguliert. Es bedient die ferngesteuerte Schleuse zwischen Interlaken und Unterseen und berücksichtigt dabei in einem grossräumig abgestimmten Verbund unterschiedliche Nutz- und Schutzinteressen – wie etwa jene der Wasserkraftnutzung, Schifffahrt und Fischerei sowie des Hochwasserschutzes.

Grosse Mengen an Schwebstoffen

Bedingt durch das zu rund einem Fünftel vergletscherte Einzugsgebiet und die auch in den Gletschervorfeldern hohe Erosion schwemmen Aare und Lütschine grosse Mengen an mineralischen Schwebstoffen in den Brienzersee. Die entsprechenden Frachten belaufen sich heute im Mittel jährlich auf gut 300'000 Tonnen. Während der Abfluss der Lütschine – bis auf wenige Massnahmen zum Schutz vor Hochwasser – einen natürlichen Verlauf hat, wird die Aare seit den 1930er-Jahren stark durch die Anlagen der Kraftwerke

Oberhasli KWO im Grimselgebiet beeinflusst. Ihre Staumauern halten einen Teil des sommerlichen Schmelz- und Niederschlagswassers in den vier grössten Stauseen Oberaar-, Grimsel-, Räterichsboden- und Gelmersee zurück, um es im Winter zu turbinieren. Dadurch gelangt im Sommer weniger Wasser in den Brienersee als unter natürlichen Umständen, während der Zufluss in der kalten Jahreszeit heute durch den Kraftwerkbetrieb deutlich grösser ist. Zudem werden Hochwasserspitzen gebrochen und jährlich 232'000 Tonnen Partikel auf dem Grund der Stauseen abgelagert, die sonst ebenfalls in den Brienersee geschwemmt würden.

Gletschermilch prägt die Farbe des Sees

Auf Grund der Unterschiede in den Einzugsgebieten sind auch die Einschichtungstiefen der zwei wichtigsten Zuflüsse in den Brienersee etwas verschieden. Da die Aare deutlich weniger Schwebstoffe führt und ihr Wasser einen tieferen Salzgehalt aufweist, schichtet sie sich häufiger – und im Vergleich zur Lüttschine tendenziell auch höher – in das oberflächennahe Seewasser ein. Damit trägt sie stärker zur sichtbaren Trübung des Brienersees bei als die Lüttschine.

Die Gletschermilch der beiden Zuflüsse prägt das trübe, türkisfarbene Erscheinungsbild des Sees, der je nach Jah-

Der Brienersee auf einen Blick

Fläche des Sees	29,8 km²
Mittlere Tiefe des Sees	172 Meter
Maximale Tiefe des Sees	259 Meter
Fassungsvermögen des Sees	5,15 Milliarden m³
Mittlere Aufenthaltszeit des Wassers im See	980 Tage
Fläche des Einzugsgebiets	1134 km²
Fläche des Teileinzugsgebiets Hasliaare	603 km²
Fläche des Teileinzugsgebiets Lüttschine	391 km²
Mittlere Höhe des Einzugsgebiets über Meer	1950 Meter
Höchster Punkt des Einzugsgebiets (Finsteraarhorn)	4272 Meter

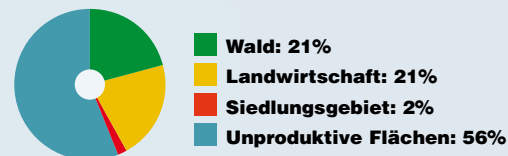
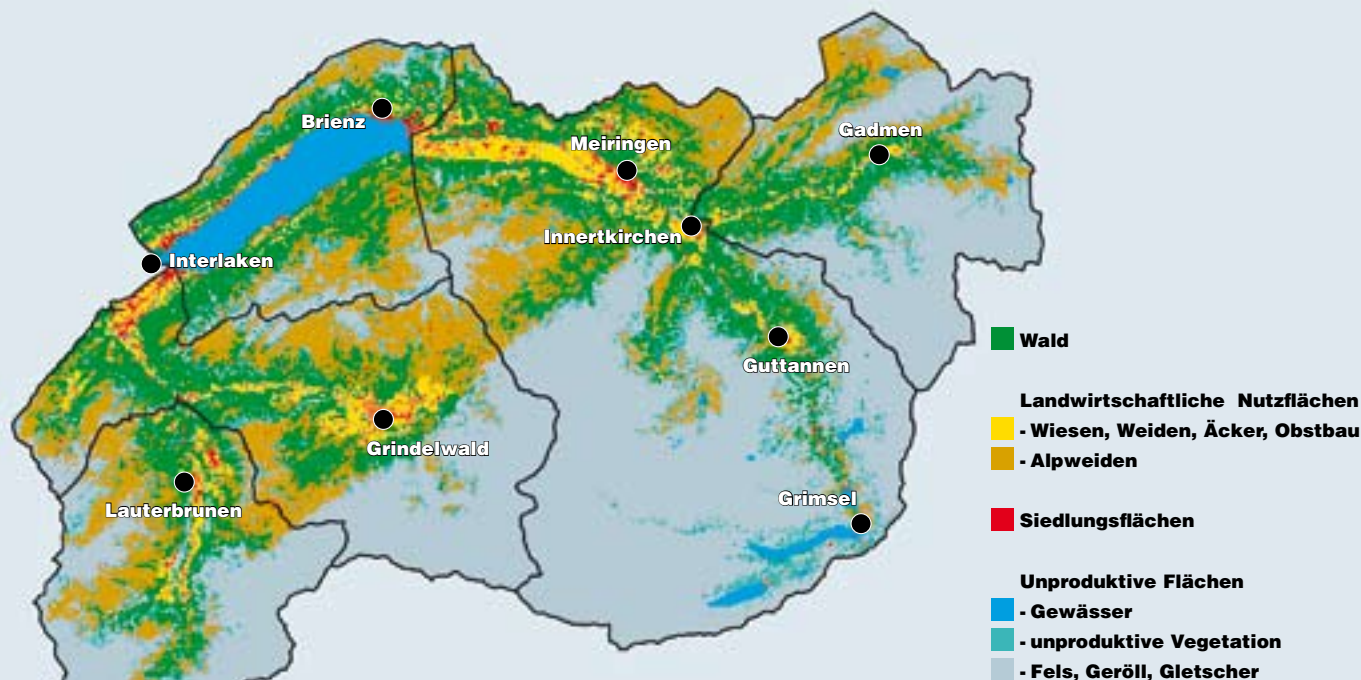
reszeit seine Farbe verändert. Im Winter, wenn die Transparenz des Wassers am grössten ist, dominiert ein Blau mit einem leicht grünlichen Einschlag. Mit zunehmender Trübung im Frühling gewinnen die Grüntöne an Intensität, und im Hochsommer hat der Brienersee eine grau-grüne Farbe mit einem leuchtenden, milchig-weisslichen Einschlag. Mit dem Ende der Gletscherschmelze im Herbst nimmt der Partikeleintrag ab, während die im Sommer angeschwemmten Schwebstoffe im See langsam auf den Grund absinken. So gewinnt der Brienersee seine Transparenz und damit die vorwiegend blaue Farbe allmählich wieder zurück.

Mächtige Sedimente in den Deltas

In den ungestört abgelagerten Sedi-

menten des Sees sind in den letzten 75 Jahren keine offensichtlichen Veränderungen nachzuweisen, die sich auf äussere Einflüsse im Einzugsgebiet zurückführen liessen. Die Deltabereiche von Aare und Lüttschine sind charakterisiert durch hohe Ablagerungen und Sandgehalte sowie ein unruhiges Relief mit deutlicher Rinnenbildung. Katastrophale Murgänge – wie jener des Lammbachs von 1896 oder der Ausbruch des Glyssibachs bei Brienz im August 2005 – und mächtige Rutschungen im See wie diejenige von 1996 im Aaredelta führen in den Mündungsbereichen und im zentralen Tiefenwasser immer wieder zur Ablagerung grosser Sandmengen und zur Bildung mächtiger Sedimentschichten.

Die wichtigsten Kategorien der Bodennutzung im Einzugsgebiet



Im alpin geprägten Einzugsgebiet des Brienersees machen Gletscher, Fels, Geröll und Gewässer 56 Prozent aus. Auf Grund der extensiven Landnutzung fliessen dem See nur wenig Nährstoffe zu. (Daten: Arealstatistik 1992/97, BFS GEOSTAT)

Der Felchenertrag bleibt auch in Zukunft bescheiden



Der Spezialfang mit engmaschigen Netzen täuscht: Im Brienersee nehmen die Felchenfangerträge seit Jahren ab.

Die Fischer am Brienersee müssen sich langfristig auf geringe Fänge einstellen. Äusserst tiefe Nährstoffgehalte limitieren das Futterangebot für Fische und lassen in Zukunft jährliche Fangerträge von nur 2 bis 3 Kilo pro Hektare Seefläche erwarten. Die Felchen als wichtigste Brotfische sind deutlich kleiner als früher und haben stark an Gewicht eingebüsst. Mit weiteren Einbrüchen ihrer wichtigsten Futterbasis – wie im Jahr 1999 – ist auch künftig zu rechnen.

Zwischen 1975 und 1981 gingen den Berufsfischern des Brienersees pro Hektare Seefläche im Durchschnitt 14 Kilo Felchen ins Netz. Dagegen mussten sie sich von 2001 bis 2005 mit einem mittleren Jahresertrag von 1,9 Kilo ihres Brotfisches begnügen. Dieser macht heute mit knapp 5700 Kilo pro Jahr etwa 80 Prozent des Gesamtfangs aus. Im Vergleich dazu haben es die Arbeitskollegen am Bielersee deutlich besser. In der gleichen Zeitperiode holten sie pro Hektare durchschnittlich 22 Kilo oder gut 11 Mal soviel Felchen aus dem Gewässer.

Die Fangerträge sinken mit dem Phosphatgehalt des Sees

Die Diskrepanz der Fangerträge widerspiegelt die völlig unterschiedliche Nährstoffsituation der beiden Seen. Der Brienersee ist mit seinem alpin geprägten Einzugsgebiet ein äusserst nährstoffarmes Gewässer mit nur geringer Phosphatzufuhr und entsprechend schwacher Algenproduktion. So hat sein in den letzten drei Jahrzehnten laufend sinkender Phosphatgehalt allein zwischen 1994 und 2002

von 3 auf weniger als 1 Mikrogramm pro Liter abgenommen und sich seither auf diesem tiefen Niveau eingependelt.

Im Bielersee hingegen ist dieser entscheidende Nährstoff in rund 10 Mal höherer Konzentration vorhanden, so dass viel mehr Algen gedeihen, die am Anfang der Nahrungskette stehen. Etwa im gleichen Verhältnis gehen den Fischern hier deshalb auch mehr Felchen ins Netz.

Stabilisiert sich die Phosphatkonzentration des Brienersees auf den niedrigen Werten der letzten Jahre, ist künftig noch mit einer jährlichen Nettoproduktion der Felchen von höchstens 8 Kilo pro Hektare zu rechnen. Geht man davon aus, dass die Fischerei etwa 30 Prozent davon abschöpfen kann, so ergeben sich realistische mittlere Jahreserträge von maximal 2 bis 3 Kilo je Hektare oder zwischen 6 und 9 Tonnen für den ganzen See.

Ähnliche Fangzahlen wie 1950

Diese Erträge sind vergleichbar mit den Fängen in anderen nährstoffarmen Seen. Auf Grund der Phosphatgehalte können die Fischer nicht mehr erwarten. Der Brienersee

ist diesbezüglich also keine Ausnahme. Vielmehr musste man sich bis in die 1950er-Jahre mit noch geringeren Fängen bescheiden. Vor 1950 lag der Ertrag pro Hektare immer unter 2 Kilo. Dann nahm die Nährstoffzufuhr vor allem durch Phosphat-Einträge aus ungeklärtem Abwasser und teilweise auch durch Abschwemmungen von landwirtschaftlich genutzten Flächen in die fliessgewässer und in den See stark zu. Gleichzeitig ermöglichte der technische Fortschritt den Berufsfischern eine höhere Effizienz, wobei insbesondere der Einsatz von Motorschiffen anstelle von Ruderbooten und die neuen Kunststoffnetze zu steigenden Fangerträgen führten. Obwohl es zwischen durch immer grosse natürliche Schwankungen gab, kletterten die Fangzahlen in den besten Jahren von 1975 bis 1981 in mehreren Stufen auf Rekordwerte.

Einbrüche in Etappen

Seither geht es jedoch stetig bergab. Der Bau von Kläranlagen mit Phosphatfällung, das 1986 in Kraft getretene Phosphatverbot für Waschmittel, strengere Vorschriften

für den Gülleauswurf und die bessere Anpassung der Düngung an den Nährstoffbedarf der Pflanzen liessen die Phosphatkonzentration im See – und damit auch die Produktivität der Felchenbestände – laufend sinken. Seit den Maximalfängen, die noch bis 1981 mehrmals über 15 Kilo lagen, verringerte sich der Ertrag in den 1980er-Jahren auf etwa 10 Kilo pro Hektare, brach nach 1990 auf durchschnittlich gut 5 Kilo ein und erreichte schliesslich 1999 und 2000 einen Tiefpunkt unter 1 Kilo, wie man ihn seit den Kriegsjahren nie mehr erlebt hatte. Im Vergleich zum Vorjahr fingen die Berufsfischer noch gerade 10 Prozent der Felchen, was zu einem temporären Zusammenbruch der Netzfischerei am Brienzensee führte.



Hungernde Felchen

Die im Hochwasserjahr 1999 gefangenen Fische waren mager und offensichtlich schlecht ernährt. Im Rahmen seiner Routineuntersuchungen stellte das kantonale Gewässer- und Bodenschutzlabor GBL im Brienzensee gleichzeitig ein fast völliges Verschwinden der Daphnien fest. Diese Kleinkrebse sind ein Teil des Zooplanktons und bilden die wichtigste Futterquelle der Felchen.

Seit 2001 wachsen die Fische zwar wieder etwas besser, aber deutlich langsamer als früher. Erreichte ein vierjähriger, geschlechtsreifer Brienzlig vor 20 Jahren noch eine Körperlänge von 25 bis 30 Zentimeter, so sind es heute kaum mehr 20 Zentimeter. Vergleicht man das Gewicht von zwei so unterschiedlich langen Brienzlig, erscheint die Abnahme um 70 Prozent in dieser Zeit noch dramatischer. Auch die schneller wachsenden Felchen bringen inzwischen nur noch die Hälfte des Gewichts ihrer Artgenossen der 1980er-Jahre auf die Waage. Ein Berufsfischer, der seinen Fang pro Kilo ver-

Die Felchen im Brienzensee sind heute nur noch halb so schwer wie ihre Artgenossen der 1980er-Jahre.

kauft, muss also mittlerweile doppelt so viele Felchen und drei- bis viermal so viele Brienzlig fangen wie vor 20 Jahren, um auf denselben Ertrag zu kommen.

Wie Wachstumsanalysen zeigen, besteht ein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen dem Bestand der Daphnien und dem Wachstum der Felchen in der dafür wichtigen Jahreszeit von Mai bis September. Mit Ausnahme der Jungfische im ersten Lebensjahr, die sich primär von Hüpferlingen – einem anderen Kleinkrebs – ernähren, gilt dies für den Zuwachs der Felchen im zweiten, dritten und vierten Lebensjahr. Dabei zeigt sich über längere Zeit auch eine nachweisbare Verknüpfung zwischen dem Gehalt an Nährstoffen im See sowie der Längen- und Gewichtsentwicklung der Fische.

Abhängigkeit von den Daphnien

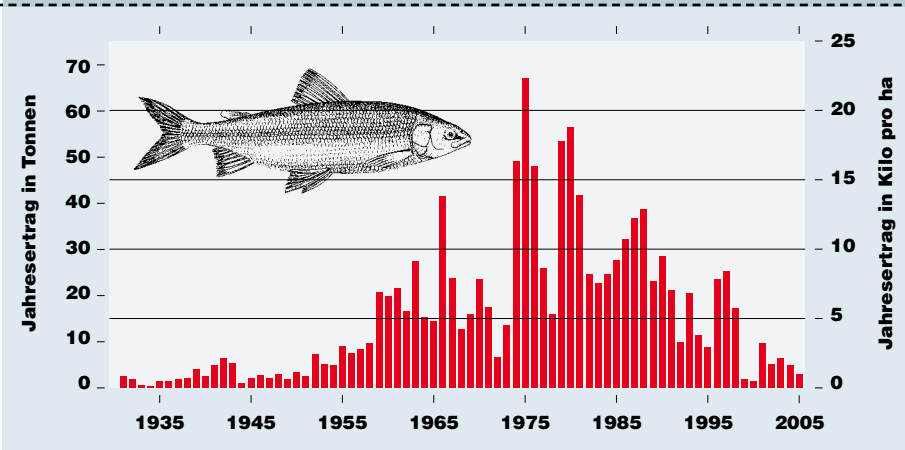
Solche Vergleiche waren im Rahmen des Forschungsprojekts nur möglich, weil das

kantonale Fischereinspektorat seit 1984 monatlich 25 Fische aus dem Tagesfang eines Berufsfischers untersucht und dabei – neben anderen Merkmalen – auch Länge, Gewicht und Alter bestimmt. Aus den Jahren 2001 und 2002 liegen zusätzlich Analysen des Mageninhalts von rund hundert Brienzseefelchen vor. Die Fachleute stellten dabei fest, dass zwischen dem Gewichtsanteil des Zooplanktons im Magen der Fische und dessen Gesamtbestand im See ein direkter Zusammenhang besteht, der bei Daphnien am stärksten ist. Seit 1997 nimmt die Zahl der Daphnien im Brienzensee ab, was zur Folge hat, dass die Fische immer seltener auf das Zooplankton treffen und somit auch weniger fressen können. Dies ist der Hauptgrund für das langsamere Wachstum der Felchen.

Stark verminderte Nahrungsaufnahme

Im Rahmen der Brienzensee-Studie durchgeführte Modellrechnungen gehen dem permanenten Hunger auf den Grund. Felchen filtern nicht einfach das Wasser, sondern schnappen ihre Beute gezielt. Sind genügend Futtertiere vorhanden, was bei einem hohen Bestand von rund 1500 erwachsenen Daphnien je Kubikmeter Wasser – wie etwa im November 1995 – der Fall ist, können die Felchen pro Minute knapp 60 Daphnien fressen. Der im November 1999 stark reduzierte Bestand von bloss noch 5 ausgewachsenen Daphnien je m³ verringerte ihre mögliche Fressleistung auf nur 2,4 Tiere pro Minute. Noch härter traf es den kleineren und langsameren Brienzlig, der im gleichen Zeitraum statt 50 lediglich 0,8 Daphnien fressen konnte. Der Brienzlig scheint demnach viel stärker von der Reduktion der Nahrungsgrundlage betroffen zu sein als der Felchen. Wegen dem geringen Bestand an Daphnien haben die Fische heute vor allem im Frühling und Frühsommer

Felchenfangerträge der Berufsfischer am Brienzensee



Unter natürlichen Bedingungen war der Brienzensee nie ein ertragreiches Fischgewässer, wie die Fangzahlen zwischen 1930 und 1950 zeigen. Trotz natürlicher Schwankungen der Bestände sind die Auswirkungen des verminderten Nährstoffeintrags durch den Bau von Kläranlagen nach 1975 deutlich zu erkennen.



Seit 1984 untersucht das Fischereinspektorat (rechts) monatlich 25 Fische aus dem Tagesfang eines Berufsfischers und bestimmt dabei auch Länge, Gewicht und Alter der Felchen.

Mühe, ihren Tagesbedarf an Nahrungsorganismen zu decken.

Die geringe Produktivität des Brienersees bewirkt ein instabiles Nahrungsnetz. Aus diesem Grund ist ein Einbruch der wichtigsten Futterbasis der Felchen – gemäss den wissenschaftlichen Erkenntnissen – jeweils im Frühling auch künftig wieder möglich.

Auswirkungen auf die Fortpflanzung

Die Anzahl der produzierten Eier hängt bei den Fischen vom Körpergewicht ab. Deshalb wirkt sich das reduzierte Wachstum zusätzlich auch auf die Fortpflanzung aus. 1999 erreichte die Gesamtzahl der abgelegten Eier durch den Zusammenbruch des Nährtierbestandes vor allem beim Brienzlig einen Tiefpunkt. Entscheidend war dabei der Futtermangel kurz vor der Laichsaison im August. Da die grösseren Felchen im Dezember laichen, bekamen sie dies etwas weniger zu spüren,

zumal der Einbruch der Daphnien vorab die Entwicklung im Frühsommer betraf. Insbesondere beim Brienzlig dürfte sich das beschränkte Nahrungsangebot auch auf die Entwicklung der Geschlechtsorgane auswirken.

Unwahrscheinlicher Einfluss der Trübung

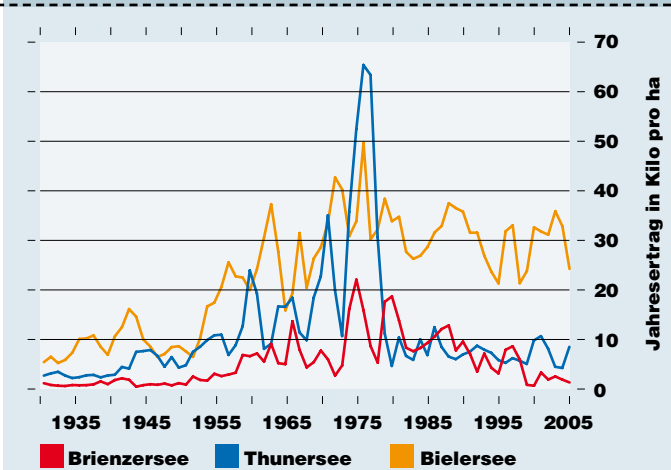
Eine erhöhte Trübung im See reduziert die Sichtweite der Felchen und könnte damit im Extremfall auch deren Fressleistung beeinträchtigen. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn die vom Zooplankton bevorzugten und für die Felchen als Nahrungsgründe wichtigen Wasserschichten durch Schwebstoffe stark getrübt werden. Wie Messresultate und Simulationen des Schwebstoffgehalts im Brienersee mit und ohne Stauseen im Einzugsgebiet zeigen, tritt die stärkste Trübung in der Regel im Sommer unterhalb von 10 Metern auf. Damit liegt sie meistens unter den Was-

erschichten, in denen die Felchen ihr Futter hauptsächlich suchen und finden. Solange die Schwebstoffe nicht während mehrerer Wochen in den oberen Wasserschichten verbleiben, ist eine direkte Beeinflussung des Felchenwachstums unwahrscheinlich. Weil die Fachleute keine langfristige Veränderung der Trübung feststellen konnten, lässt sich das reduzierte Wachstum der Felchen auch nicht damit erklären.

Dezimieren die Felchen ihre Futterorganismen?

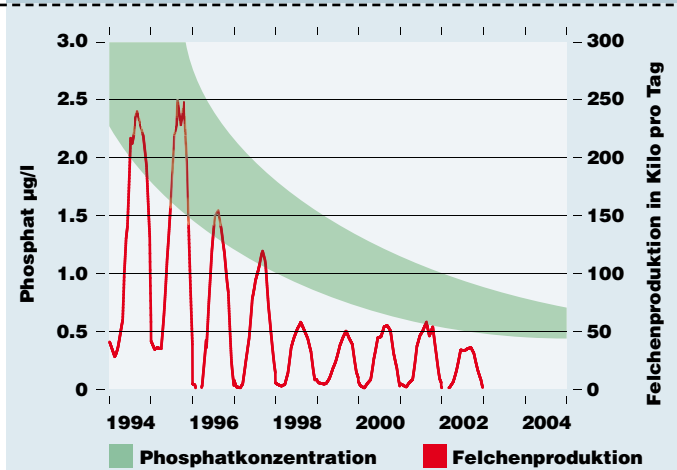
Im Rahmen der Brienersee-Studie ist auch abgeklärt worden, inwiefern die Felchen selbst ihre Nahrungsgrundlage dezimiert haben und so am Verschwinden der Daphnien im Jahr 1999 beteiligt sein könnten. Nimmt man an, dass die Felchen ausschliesslich Daphnien fressen, so beseitigen sie bei normaler Entwicklung ihrer Futterorganismen im Sommer täglich

Fischfangerträge in den drei Berner Seen



Nicht nur im Brienersee gingen die Fangerträge der Berufsfischer nach den Höchstständen in den 1970er-Jahren zurück. Trotz ebenfalls geringer Nährstoffzufuhr ist der Thunersee leicht produktiver als der Brienersee, weil sein Wasser klarer ist.

Phosphatgehalt und Felchenproduktion im Gleichschritt



Der Phosphatgehalt im Brienersee erreicht heute noch knapp ein Drittel der Konzentrationen der frühen 1990er-Jahre. Auf Grund des zunehmend knappen Nahrungsangebots hat auch die Nettoproduktion der Felchen markant abgenommen.

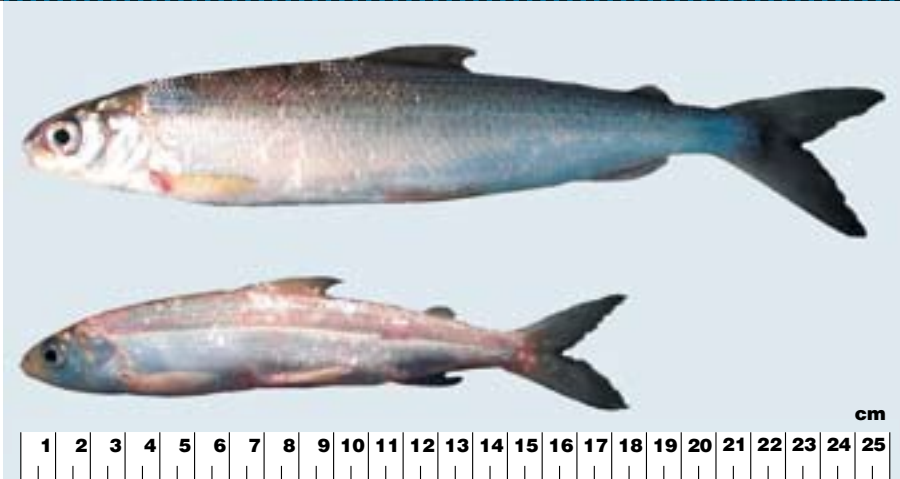
Brienzig und Felchen

0,5 bis 1,5 Prozent des Zooplanktons. Wie Auswertungen der Magenanalysen und der Zooplanktonbestände für die Jahre 2001 und 2002 zeigen, besteht die Felchennahrung jedoch nicht ausschliesslich aus Daphnien. Speziell im Frühling sind auch Mückenlarven und im Sommer grössere Raubkrebse wichtige Nahrungsbestandteile. Wird den Modellrechnungen diese differenzierte Nahrungszusammensetzung zu Grunde gelegt, übersteigt der Daphnienfrass der Felchen pro Tag nur selten 1 Prozent des Bestandes.

Grundsätzlich könnten die Felchen zwar einen erheblichen Teil der Daphnienpopulation konsumieren und deren Aufbau – zusammen mit weiteren ungünstigen Faktoren – dadurch weitgehend unterbinden. Die seit 1997 tendenziell rückläufigen Felchenbestände haben den Frassdruck jedoch vermindert. Zudem verursachten auch Frassraten von täglich mehreren Prozent vor 1999 und nach 2000 nie einen derartigen Einbruch der Kleinkrebse wie 1999. Deshalb schliessen die Fachleute einen übermässigen Frass der Fische als alleinige Ursache für den gehemmten Aufbau der Daphnienpopulation zwischen Frühling 1999 und Sommer 2000 aus.

Nachhaltige Bewirtschaftung der Felchen

Seit 1999 haben die Berufsfischer am Brienersee viel weniger Brienzig gefangen als vor dem Einbruch des Daphnienbestandes. Wie Probefänge mit engeren Maschenweiten zeigen, hat man ihren Bestand wahrscheinlich stark unterschätzt, weil die gegenüber früher deutlich kleineren und schlankeren Fische mit den bis Ende 2005 erlaubten Netzmaschen kaum mehr gefangen werden konnten. Deshalb hat der Kanton ab 1. Januar 2006 neue Vorschriften für das Fangmindestmass und die Maschenweite erlas-



Der Brienzig (unten) ist deutlich kleiner als der Brienersee-Felchen (oben), von dem er sich optisch kaum unterscheidet. Beide Fische leben meistens in denselben Schwärmen.

Im Brienersee leben zwei Felchenformen, der kleinwüchsige Brienzig und der grössere Felchen. Die meiste Zeit des Jahres halten sie sich in den gleichen Schwärmen auf, wo sie von Auge nicht eindeutig auseinander zu halten sind. Spezialisten erkennen sie an der ungleichen Anzahl von Kiemenreusendornen sowie am unterschiedlichen Wachstum.

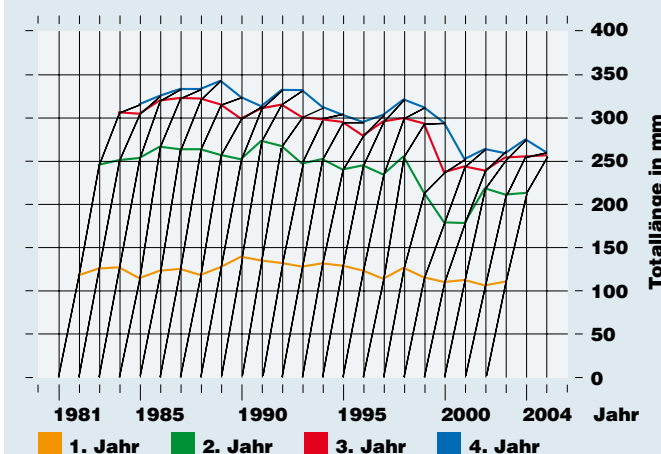
Der sommerlaichende Brienzig bevorzugt Laichplätze in 30 bis über 100 Metern Tiefe, wobei der Bestand ausschliesslich aus der Naturverlaichung stammt. Demgegenüber wird der schneller wachsende Fel-

chen, der sich erst im Dezember in den Uferpartien fortpflanzt, durch Erbrütung und Aufzucht gestützt. Zwischen 1989 und 2000 hat man im Brienersee jährlich 30'000 bis 250'000 Brütlinge ausgesetzt. Wegen dem abnehmenden Bestand hat der Kanton die Einsätze seit 2001 intensiviert. So werden nun zusätzlich Felchenbrütlinge aus dem Brienersee in Netzkäfigen im planktonreicheren Thunersee aufgezogen. Einer Steigerung der Aufzucht für den Brienersee sind auf Grund der schmalen Futterbasis jedoch enge Grenzen gesetzt.

sen. Damit verfolgt das Fischereinspektorat das Ziel, einen höchst möglichen Ertrag abzuschöpfen, ohne dadurch die Nachhaltigkeit der Fänge zu gefährden. Diese Form der Bewirtschaftung ist auch aus Artenschutzgründen wichtig, weil die Felchenformen jedes einzelnen Schweizer Sees genetisch einzigartig sind, so dass man sie bei einer Überfischung nicht ein-

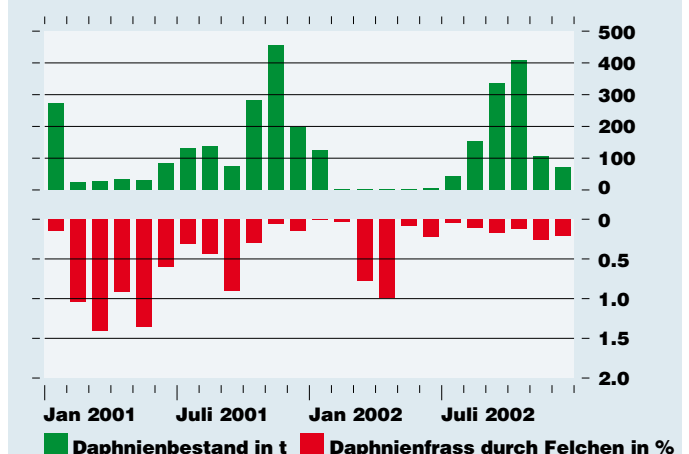
fach durch Besätze mit Brutfischen aus anderen Seen ersetzen kann. Weil man für den Brienzigfang inzwischen engmaschige Netze einsetzt, ist die Überwachung jetzt besonders wichtig. Denn es gilt zu vermeiden, dass zu viele unreife Jungfelchen gefangen werden, was den Bestand weiter schwächen könnte.

Wachstumsentwicklung der Felchen



Das geringere Futterangebot wirkt sich vor allem ab dem zweiten Lebensjahr auf das Wachstum der Felchen im Brienersee aus. 1984 erreichten sie im dritten Lebensjahr noch eine Länge von 300 mm, heute sind es nur noch 250 mm.

Wie viele Daphnien fressen die Felchen?



Wie die Auswertung der Jahre 2001 und 2002 zeigt, übersteigt der tägliche Daphnienfrass der Felchen nur selten 1 Prozent der Population. Damit wird der Bestand der Kleinkrebse in seiner wichtigen Wachstumsphase im Frühling normalerweise nicht stark gehemmt.

Ein neuerlicher Zusammenbruch ist möglich



Mit diesem Zwillingsnetz lässt sich das Zooplankton bis in grosse Tiefen beproben.

Die mangelnde Futterbasis, tiefe Wassertemperaturen und der ausserordentliche Abfluss während des Hochwassers im Frühling waren 1999 die Hauptgründe für den Zusammenbruch der Daphnienpopulation im Brienersee. Dagegen lassen sich Schwebstoffe und Parasiten als ebenfalls vermutete Ursachen ausschliessen. Bedingt durch das zunehmend knappe Nahrungsangebot ist ein erneuter drastischer Einbruch des Daphnienbestandes im Frühjahr auch künftig wieder möglich – mit entsprechenden Auswirkungen auf die Felchen.

Nach den heftigen Schneefällen vom Februar 1999 lag der Schnee im alpinen Einzugsgebiet des Brienersees im Frühling noch meterhoch. Als die Schneeschmelze im folgenden Mai und Juni mit mehrtägigen Starkniederschlägen zusammenfiel, führten Aare und Lütshine riesige Mengen an Wasser und liessen den Seespiegel rasch ansteigen.

Fachleute der Eawag – dem Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs – haben die entsprechenden Auswirkungen auf die Daphnien untersucht. Nach ihren Erkenntnissen dämpfte der während eineinhalb Monaten unüblich hohe Seedurchfluss die Entwicklung der Population im Brienersee ausserordentlich stark. Die Kleinkrebse können in der Wassersäule zwar auf- und absteigen, doch auf Grund ihrer eingeschränkten Schwimmfähigkeit sind sie weitgehend den Strömungen ausgeliefert. Die Forschenden gehen davon aus, dass viele der vorhandenen Daphnien in der fraglichen Zeit vom Hochwasser zum Seeausfluss der Aare und flussabwärts Richtung Interlaken gespült

wurden. Wochenlang waren die Verluste durch diesen Abfluss grösser als das Wachstum des Bestandes. Dadurch gelang es der Population im Jahr 1999 nicht, sich im Frühsommer wie üblich im See zu entwickeln. Von Februar bis August war der Bestand so klein, dass man die Daphnien bei Routineuntersuchungen nicht mehr nachweisen konnte.

Schlechte Startbedingungen

Weil die Eientwicklung der Daphnien von der Temperatur abhängt und kaltes Wasser das Schlüpfen der Jungtiere verzögert, herrschten im Frühjahr 1999 ohnehin schlechte Startbedingungen. In der kritischen Entwicklungsphase der Population war der Brienersee in den obersten 10 Metern bis zu 3 Grad kälter als im Normalfall. Der grosse und kalte Zufluss spülte das erst spärlich erwärmte Oberflächenwasser damals überdurchschnittlich rasch aus. Auf Grund der reduzierten Temperatur wuchs die Daphnienpopulation nur sehr langsam und konnte die durch

den verstärkten Abfluss verursachten Verluste im Mai und Juni somit nicht durch Wachstum kompensieren.

Immer kleinere Population

Seit Beginn der Routineuntersuchungen im Brienersee durch das Gewässer- und Bodenschutzlabor GBL des Kantons Bern ist die Daphnienpopulation im Lauf der letzten zehn Jahre ständig kleiner geworden. Die Tiere reagieren damit auf den Rückgang des Nährstoffeintrags, der das Algenwachstum begrenzt. Das geringe Nahrungsangebot limitiert die Entwicklung der Daphnien während des ganzen Jahres und erlaubt ihnen zwischen Dezember und April kein Populationswachstum. Nach dem üblichen Einbruch im Winter brauchen sie deshalb immer länger, um sich in der wärmeren Jahreszeit wieder im See zu vermehren.

Daphnien klonen ihren Nachwuchs

Daphnien sind kleine Krebstiere, die in Schweizer Seen bis zu 2 Millimeter gross werden. Sie verfügen über einen Filterapparat, mit dem sie das Wasser filtern und sich auf diese Weise mehrheitlich von Algen, aber auch von Bakterien und weiterem organischem Material ernähren. Dabei gelangen auch mineralische Schwebstoffe in die Verdauung.

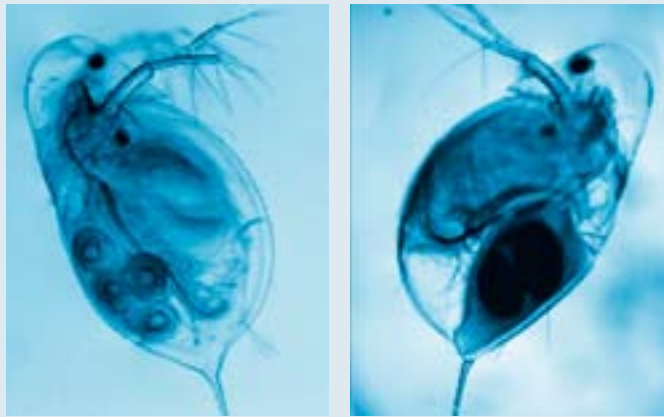
Zusammen mit anderen Zooplanktonarten spielen die Daphnien eine zentrale Rolle in der Nahrungskette eines Sees. Für viele Fische wie zum Beispiel die Felchen, welche hauptsächlich von tierischem Plankton leben, bilden sie mit Abstand die wichtigste Futterquelle. Im Spätfrühling, wenn das Angebot an Algen in den Seen durch die zunehmende Lichteinstrahlung immer grösser wird, wächst die Population der Kleinkrebse normalerweise rasch an.

Geklonte und befruchtete Jungtiere

In den nahrungsreichen Sommermonaten leben in einem See nur Daphnienweibchen, die ohne Befruchtung – und damit ohne Männchen – Nachkommen bilden können. Diese Jungtiere sind genetisch identisch mit ihrer Mutter, stellen also Klone von ihr dar. Sobald sich das Angebot an pflanzlichem Plankton verschlechtert,

– sei es durch den eigenen Frassdruck auf die Algen oder als Folge der kürzeren Herbsttage und tieferen Temperaturen –, stellen die Weibchen oft auf die sexuelle Reproduktion um. Sie produzieren nun Männchen und Dauereier. Letztere werden von den Männchen befruchtet und dann ins Wasser abgegeben, wo sie zum Seegrund sinken. Im Frühling können daraus wieder junge Daphnien schlüpfen. Bleiben die Dauereier im Oberflächenfilm des Wassers gefangen, so werden sie bisweilen von Winden und Strömungen ans Ufer gespült. Weil die Eier sehr robust sind und Eis, Austrocknung und selbst den Magen von Fischen unbeschadet überste-

hen, kann sich eine lokale Daphnienpopulation auch nach einem völligen Einbruch wieder neu in einem See aufbauen. Dies kann durch Dauereier aus dem betroffenen Gewässer oder aus anderen Seen geschehen, woher sie zum Beispiel zufällig durch Wasservögel oder Menschen transportiert werden. Im Normalfall bilden die Dauereier eine Art Überbrückungshilfe für das Überstehen der nahrungsarmen Zeit im Winter, während der die asexuellen Weibchen keine Eier bilden können.



Ein Daphnienweibchen mit asexuellen Eiern, die ohne Befruchtung entstehen (links) und eines mit sexuell erzeugten Dauereiern (rechts).

Hungerphase im Winter

Die Daphnien des Brienersees verfügen über zwei Strategien, um die winterliche Hungerphase zu überstehen. Einerseits überwintern die Weibchen als asexuelle Population, andererseits produzieren sie im Herbst Dauereier, aus denen im Frühling – stimuliert von Licht und Wärme – wieder Jungtiere schlüpfen (siehe Kasten). Falls sich die Nahrungsgrundlage im Winter künftig weiter verschlech-

tert, so wird die erste Überlebensstrategie immer riskanter. Die spezielle Topographie des Brienersees schmälert aber auch den Schlüpfertag der Dauereier. Denn geeignete seichte Stellen mit einer Wassertiefe von höchstens 20 Metern, wo die Jungtiere überhaupt aus den Dauereiern schlüpfen können, machen im steil abfallenden Becken nur gerade 8 Prozent der gesamten Seefläche aus. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit relativ gross, dass die Dauereier – je nach Ort der Eiabga-

be, Wind und Strömung – an ungünstigen Stellen absinken, wo sie für immer liegen bleiben.

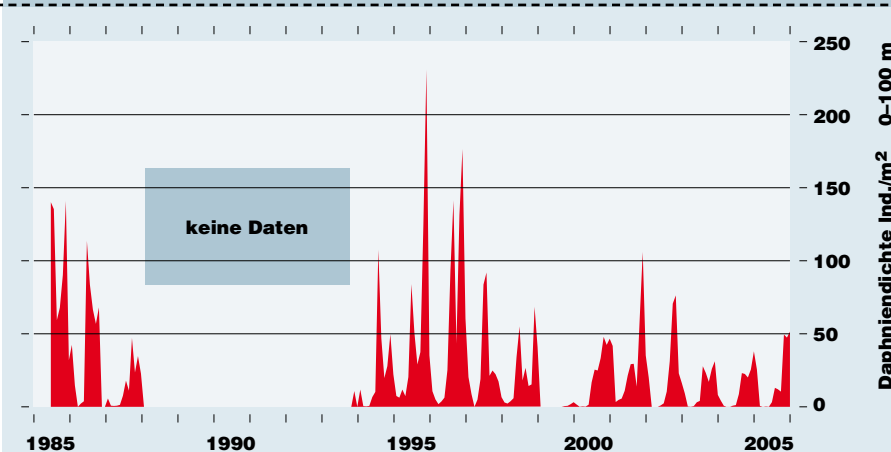
Die Daphnien fehlten schon früher

Von Februar bis August 1999 konnte das GBL im Brienersee keine Daphnien nachweisen. Das weitgehende Fehlen der Kleinkrebse war jedoch keine einmalige Ausnahmeerscheinung. Wie Analysen der Eawag von Sedimentkernen zeigen, lassen sich Dauereier auf dem Grund des Sees bis zurück ins Jahr 1955 nachweisen. Zwischen 1918 bis 1955 fehlten sie in den Ablagerungen der Sedimente aber ganz. Die Erkenntnis deckt sich mit der historischen Literatur, die wiederholt vom Fehlen der Daphnien im Brienersee berichtet, so etwa für die Jahre 1876, 1895, 1898, 1921, 1922, 1945 und 1946. Hingegen wurden sie 1897 nachgewiesen. Vor 1955 scheinen sich die Tiere also nie dauerhaft im See etabliert zu haben, sondern sind nur in einzelnen Jahren aufgetaucht.

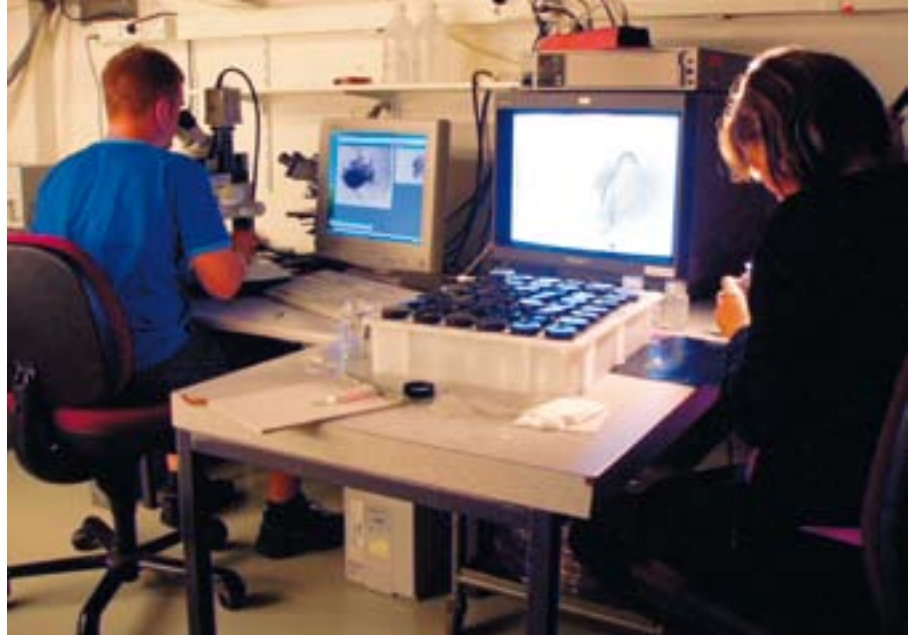
Einbrüche auch künftig möglich

Laut den Fachleuten der Eawag ist die Population im See heute so labil, dass Stressfaktoren in der wichtigen saisonalen Entwicklungsphase – wie etwa ein Frühlingshochwasser oder eine kurzfristige Reduktion der Algenproduktion – wiederum zu einem Einbruch der Daphnien

Anzahl Daphnien pro m² in 1000 von 1985 bis 2005



Die Daphniendichte im Brienersee folgt einem saisonalen Muster mit beträchtlichen natürlichen Schwankungen. Angegeben ist die Zahl der Individuen von 0 bis 100 Meter Tiefe. Im Hochwasserjahr 1999 konnten die Fachleute des Kantons im See nur vereinzelte Daphnien nachweisen.



Im Rahmen der Forschungsarbeiten sind die im Brienzensee gefangenen Daphnien in den Labors der Eawag umfassend untersucht worden. Dabei zeigte sich unter anderem, dass der Gehalt an Trübstoffen im See zu tief ist, um die Daphnien zu schädigen.

führen könnten. Obwohl deren Bestand seit Mitte der 1990er-Jahre laufend abgenommen hat, halten die Wissenschaftler ein völliges Verschwinden der Tiere aus dem Brienzensee in naher Zukunft aber für sehr unwahrscheinlich. Denn selbst wenn die asexuellen Weibchen den Winter nicht überstehen, könnte die Population immer wieder aus Dauereiern entstehen, die entweder aus dem Brienzensee selbst oder aus anderen Gewässern stammen. Dies mag erklären, weshalb sich die dezimierte Daphnienpopulation, von der das GBL im Herbst 1999 nur wenige Tiere fand, im Folgejahr wieder erholte.

Keine kritische Konzentration an Schwebstoffen

Da Daphnien ihre Umgebung filtrieren und dabei wahllos Partikel zwischen 0,5 und 40 Mikrometer aufnehmen, konsumieren sie auch mineralische Schwebstoffe.

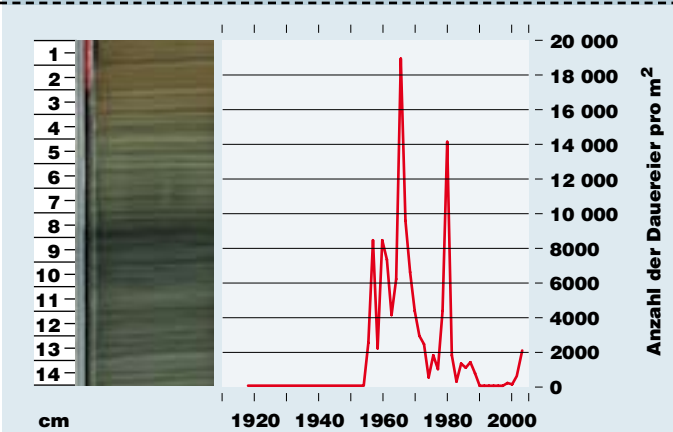
Wie frühere Felduntersuchungen aus anderen Seen zeigen, können diese unter besonderen Umständen die Nahrungsaufnahme, Fitness und Fruchtbarkeit des Zooplanktons vermindern. Dabei beeinträchtigen besonders hohe Konzentrationen an Schwebstoffen das Populationswachstum und unter ungünstigen Umständen auch das Überleben der Tiere.

Wie eigens mit Daphnien und Schwebstoffen aus dem Brienzensee durchgeführte Experimente zeigen, sind die Gehalte an Trübstoffen im See jedoch zu tief, um die Daphnien zu schädigen. Problematisch wären erst Konzentrationen ab zirka 25 Milligramm pro Liter, wenn gleichzeitig kaum Nahrung vorhanden ist. Mit Ausnahme einer Phase unmittelbar nach dem August-Hochwasser von 2005, als man in einzelnen Tiefenschichten 24 Milligramm je Liter registrierte, sind in den oberflächennahen Schichten der Seemitte bisher

nie derart hohe Werte gemessen worden. Dies gilt auch für das Hochwasser 1999. Von April bis August waren die Schwebstoffgehalte im See damals mit bis zu 6 Milligramm pro Liter zwar überdurchschnittlich lange hoch, erreichten jedoch nicht die für Daphnien kritischen Werte. Deshalb schliessen die Fachleute einen Zusammenhang zwischen dem Schwebstoffgehalt und dem allgemeinen Daphnienrückgang im Brienzensee aus.

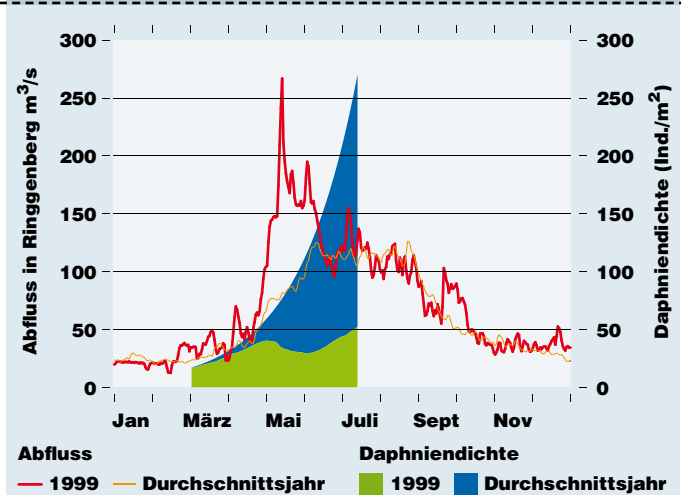
Umgekehrt ist ein Einfluss der Daphnien auf die sommerliche Sichttiefe im See jedoch denkbar. Bestandesgrößen, wie sie noch im Sommer 1995 auftraten, waren theoretisch in der Lage die obersten 50 Meter des Brienzensees in einem Monat durchzufiltern und dabei auch die Schwebstoffe teilweise aus dem Wasser zu entfernen. Zur Blütezeit der Populationen in den 1970er und 1980er-Jahren könnte dieser biologische Filtereffekt den See im Juli und August aufgeklärt ha-

Anzahl der Dauereier pro m² im Sediment



Vor 1955 scheinen sich die Daphnien nie dauerhaft im Brienzensee etabliert zu haben. Dies zeigen Sedimentkerne, in denen nach Dauereiern gesucht wurde. Ein Jahr entspricht jeweils einer hellen und einer dunklen Lage im Sediment.

Wasserabfluss und Entwicklung der Daphnien



In der ersten Jahreshälfte 1999 haben der aussergewöhnliche Abfluss im Brienzensee und das kalte Wasser die Daphnienpopulation in ihrer normalen saisonalen Entwicklung stark gehemmt. Deshalb fiel das übliche exponentielle Frühlingswachstum aus.



Mit einem Durchflussversuch wurde der Einfluss der Trübstoffe auf die Daphnien analysiert.

ben. Für eine gesicherte Aussage fehlen allerdings die Datengrundlagen. Sollten die subjektiven Beobachtungen zutreffen, wonach der See vor 10 bis 20 Jahren im Sommer kurzzeitig transparenter war als heute, würde der Daphnienrückgang eine plausible Erklärung dafür liefern.

Weder ein Versagen der Dauereier noch Parasiten als Ursache

Auch die Vermutung, wonach die Dauereier möglicherweise durch abgelagerte Partikel zugedeckt oder erstickt worden seien, haben die Forscher verworfen. Das Hochwasser 1999 führte im See nämlich nicht zu einer stärkeren Ablagerung von Schwebstoffen. Im untersuchten Uferbereich bei Iseltwald lag die durchschnittliche Sedimentationsrate in 19 Metern Tiefe 1999 mit 1,9 Millimetern sogar deutlich unter dem langjährigen Mittelwert von 3,5 Millimeter pro Jahr. Somit reichten die an den seichten Stellen des Brienersees gemessenen Stoffablagerungen nicht aus, um die Jungtiere vom Schlüpfen abzuhalten. Zudem konnten die Fachleute der Eawag im Labor auch Dauereier aus früheren Jahren zum Schlüpfen bringen. Ein Problem mit dieser Form der Fortpflanzung kommt als Erklärung für den Einbruch der Daphnien von 1999 folglich nicht in Frage. Im Sommer, wenn die Zuflüsse am meisten Schwebstoffe in den See eintragen, sind die Jungtiere ohnehin bereits aus den Dauereiern geschlüpft. Die Wissenschaftler schliessen im Übrigen auch einen entsprechenden Einfluss von Parasiten praktisch aus. Erstens liessen sich in Proben fast keine Erreger nachweisen. Zweitens ist eine hohe Ansteckungsrate angesichts der tiefen Daphniendichte im Brienersee eher unwahrscheinlich.

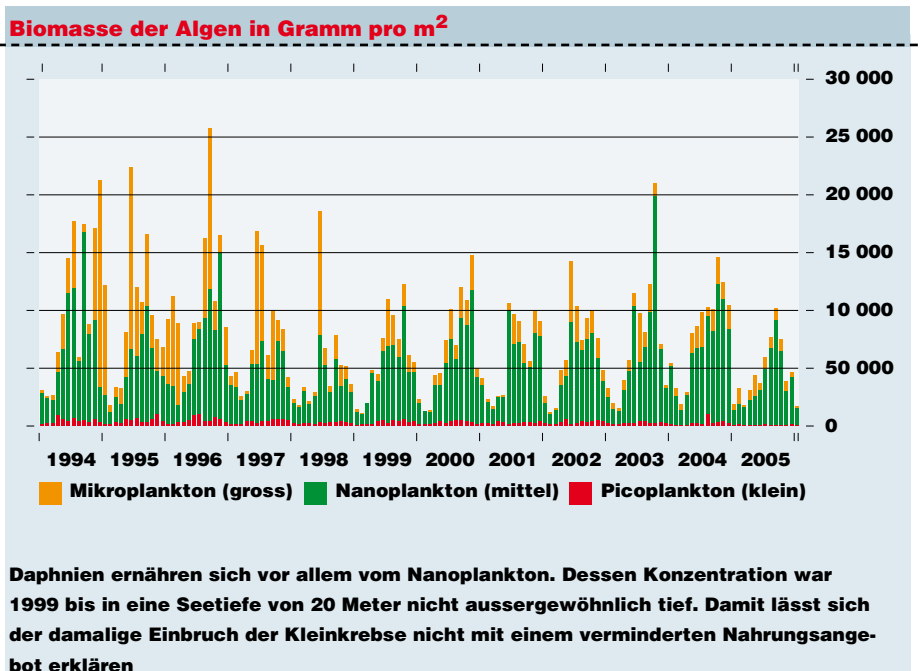


Für die Daphnien war das Hochwasser vom August 2005 keine Katastrophe. Weil sich im Spätsommer bereits eine grosse Population aufgebaut hatte, reagierten sie weniger anfällig als im Frühjahr 1999.

Andere Hochwassersituation im August 2005

Im Gegensatz zu 1999 ist der Daphnienbestand während des Hochwassers im August 2005 nicht eingebrochen. Die Ausgangsbedingungen waren nämlich völlig anders. Denn im Spätsommer hatte sich im Vergleich zum Frühling im Brienersee bereits eine üblich grosse Daphnienpopulation aufgebaut, und das Zooplankton reagierte wegen dem besseren Futterangebot und den deutlich wärmeren Wassertemperaturen weniger anfällig auf äussere Einflüsse. Zudem hielt der hohe Wasserabfluss 2005 nur zwei Wochen an und nicht anderthalb Monate wie 1999. Ausserdem schwemmt ein Hochwasser im Sommer mehr organische Bestandteile an als im Frühjahr. Diese können teilweise von den Daphnien als Nahrung genutzt werden. In solchen Fällen wirken sich Schwebstoffe unter den kritischen Kon-

zentrationen eher positiv auf die Tiere aus. Selbst bei Gehalten im schädlichen Bereich könnten die Kleinkrebse immer noch in die Tiefe oder nach oben ausweichen, da die Trübung im Brienersee durch das Einschichten der Zuflüsse nicht über alle Wasserschichten gleich verteilt ist.



Der Mangel an Nährstoffen prägt das Leben im See



Mit dieser Flasche lassen sich gleichmässige Mischproben aus den obersten 20 Metern des Sees entnehmen.

Im Brienersee beschränkt sich das jährliche Wachstum von pflanzlicher Biomasse heute auf rund 5000 Tonnen oder 67 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter. Auf die Fläche bezogen ist dies weniger als die Hälfte der Produktion im Vierwaldstättersee. Das geringe Nährstoffangebot – insbesondere der Mangel an algenverfügbarem Phosphat – und die Lichtabschwächung durch die eingetragenen Trübstoffe lassen auch in Zukunft nicht mehr erwarten. Deshalb werden die Populationen der Daphnien und Felchen im See nicht mehr die Bestandesgrössen der späten 1970er-Jahre erreichen.

Für das Algenwachstum ist das Element Phosphor auch im Brienersee der limitierende und somit entscheidende Nährstoff. Selbst wenn alle anderen Wachstumsfaktoren im Überfluss vorhanden wären, liesse der begrenzte Phosphatgehalt im See keine wesentlich höhere Planktonproduktion zu. Da die Algen am Anfang der Nahrungskette stehen, bestimmt ihr Wachstum das gesamte übrige Leben im Gewässer. Je geringer die Konzentration an biologisch verfügbarem Phosphat im See, umso weniger Biomasse wächst. Dieses beschränkte Angebot wirkt sich direkt auf die Daphnien und auf weitere Zooplanktonarten aus. Finden sie nichts zu fressen, sind ihre Bestände klein, so dass auch den Felchen die Nahrungsgrundlage fehlt.

Wenig bioverfügbares Phosphat

Durch Erosion im Einzugsgebiet werden jährlich gut 200 Tonnen Phosphor in den Brienersee geschwemmt. Diese Menge entspricht knapp 0,7 Promille der gesamten Schwebstofffracht von Aare und Lüt-

schine. 96 Prozent des Phosphors sind an schwerlösliche Mineralien und an andere – zum Teil auch organische – Partikel gebunden, die zum Grossteil auf den Seegrund absinken, ohne für das pflanzliche Plankton je verfügbar zu sein. Denn aus den Sedimenten erfolgt keine Rücklösung von Phosphat, das die Algen wieder umsetzen könnten. Auf Grund des hohen mineralischen Anteils macht der Eintrag von gelöstem, biologisch verfügbarem Phosphor aus den Zuflüssen nur die Restmenge von etwa 4 Prozent der gesamten Phosphorfracht aus. Die Fachleute der Eawag beziffern sie heute auf knapp 8 Tonnen pro Jahr, wobei der Eintrag von Kläranlagen, durch Abschwemmungen und aus der Luft mitberücksichtigt ist.

Entscheidender Beitrag der Siedlungsentwässerung

Die vom Kanton im Brienersee gemessenen Phosphatgehalte entsprechen dem geringen Eintrag aus den Zuflüssen. Mit Werten unter 1 Mikrogramm pro Liter liegen sie seit einigen Jahren im Bereich

der Nachweisgrenze. Als Vergleich dazu misst man im Bielersee rund 10 Mal höhere Werte. Die seit Mitte der 1970er-Jahre laufend sinkenden Phosphatkonzentrationen im Brienersee widerspiegeln damit vor allem den Rückgang dieses Nährstoffs aus der Siedlungsentwässerung. Belief sich die entsprechende Zulaufmenge um 1970 noch auf jährlich 25 Tonnen, so sind es heute lediglich rund 2 Tonnen. Der Eintrag von biologisch verwertbarem Phosphat aus den übrigen Quellen macht seit Jahrzehnten konstant rund 5 bis 7 Tonnen aus. Darunter fallen zum Beispiel Abschwemmungen aus Wiesen, Feldern und Wäldern sowie Einträge aus der Luft. Bei heftigen Regenfällen gelangen zudem 0,4 Tonnen gelöstes Phosphat über Entlastungen von ungereinigtem Abwasser aus der Kanalisation in die Gewässer. Den Ausschlag für das seit den 1940er-Jahren allmählich steigende und nach dem Höhepunkt von 1975 sinkende Nährstoffangebot im See gibt also in erster Linie die Entwicklung der Abwasserentsorgung.



Gletscher und Fels – wie hier in der Grimselregion – prägen das Einzugsgebiet des Brienersees. Deshalb ist der Eintrag an Nährstoffen, die das pflanzliche Plankton verwerten kann, äussert gering. Das knappe Nahrungsangebot schränkt auch die Produktivität des Zooplanktons und der Fische ein.

Rasanter Anstieg der Phosphatgehalte

Noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die menschlichen Fäkalien im Einzugsgebiet des Brienersees vielerorts in Gruben gesammelt und landwirtschaftlich verwertet. Die zunehmende Versorgung der Liegenschaften und Wohnungen mit Trinkwasser erforderte dann den Bau von Kanalisationen, die man damals noch ohne jegliche Reinigung des Abwassers in ein Gewässer einleitete. Damit überschritt der Eintrag von Phosphaten aus Urin und Fäkalien in den frühen 1950er-Jahren erstmals den Zulauf aus den übrigen Quellen. Ungefähr zur gleichen Zeit kamen neue Waschmittel auf, die bis zu 40 Prozent aus Phosphaten bestanden. Pro Einwohner gelangte damit jährlich fast ein Kilo gelöster Phosphor in den See, wovon rund 60 Prozent aus Wasch- und Reinigungsmitteln stammten.

Die starke Zunahme der Nährstoffgehalte führte in der Folge vor allem in den Mittel- und Grossseen zu einer Überdüngung. Hier wucherten die Algen, und auf dem Seegrund zehrte die Zersetzung der absterbenden Biomasse im Herbst den Sauerstoff im Tiefenwasser auf, was den Lebensraum von Fischen und anderen Wasserorganismen bedrohte.

Der Bund gibt Gegensteuer

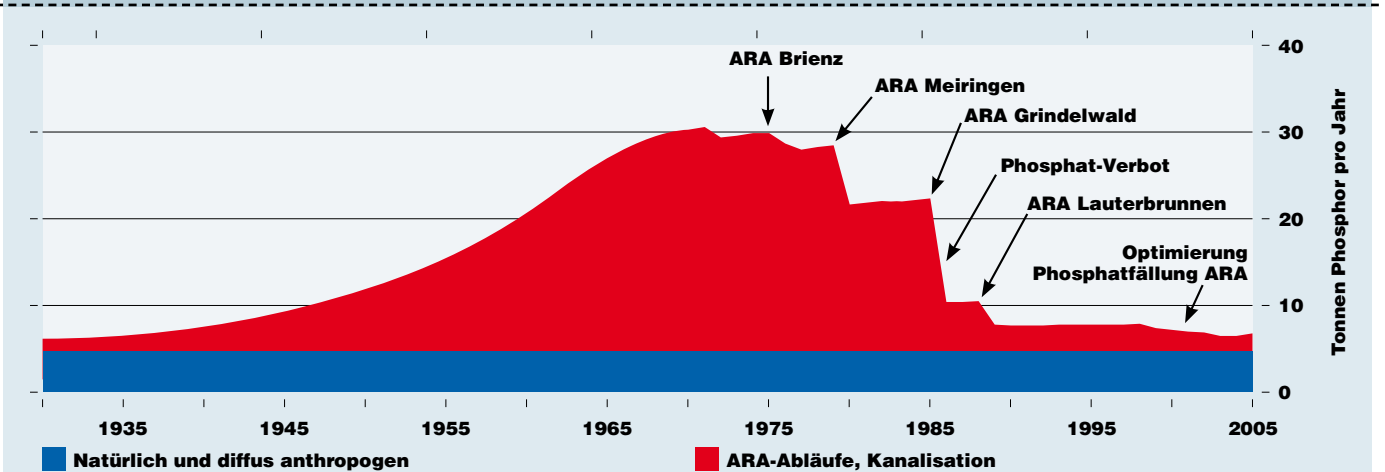
Unter anderem auf Druck der Fischer und ihrer Organisationen reagierte der Bund, indem er zuerst die Reinigung des Abwassers in Kläranlagen gesetzlich regelte, 1986 ein Verbot für Waschmittelphosphate in Kraft setzte und bei Abwasserreinigungsanlagen (ARA) im Einzugsgebiet der Seen schliesslich eine zusätzliche Reinigungsstufe zur Entfernung des Phosphors verlangte. Im Brienersee wirkten sich die Massnahmen zur Verbesserung

des Gewässerschutzes nach Inbetriebnahme der ARA Brienz im Jahr 1975 erstmals dämpfend auf die Phosphatzufuhr aus. Bis 1988 folgten weitere bedeutende ARA in Meiringen, Grindelwald und Lauterbrunnen. Diese vier Anlagen behandeln zusammen gut 90 Prozent der Abwassermenge aus dem Einzugsgebiet. Die weiteren sieben Kläranlagen in der Region sind für den Nährstoffhaushalt im See weniger wichtig. In Kombination mit dem Phosphatverbot für Waschmittel wurde der Phosphateintrag aus Abwasser in den See durch den Bau der grösseren ARA innerhalb 13 Jahren stufenweise von rund 25 Tonnen auf noch rund 3 Tonnen reduziert und seit 1989 nochmals auf die gegenwärtige Menge von 2 Tonnen gesenkt.

Effiziente Phosphatfällung in den ARA

Seit einigen Jahren bemisst sich die Höhe

Eintrag von biologisch verfügbarem Phosphat in den Brienersee



Der Phosphateintrag in den See aus natürlichen und diffusen Quellen ist seit Jahrzehnten ziemlich konstant. Die Entwicklung der Nährstoffzufuhr widerspiegelt deshalb in erster Linie die Fortschritte bei der Abwasserentsorgung im Einzugsgebiet. Seit dem Bau der ersten Kläranlage im Jahr 1975 gelangt immer weniger Phosphat in den Brienersee. Nicht zufällig gleicht die Kurve der Entwicklung der Felchenerträge auf Seite 7.



Mündung des Giessbachs in den Brienzersee: Das saubere Bachwasser enthält kaum Nährstoffe.

Ein Grossteil des Phosphats aus dem Abwasser, das bis 1975 ungeklärt in den See gelangte, wird heute in den Kläranlagen – wie hier in der ARA Brienz – ausgefällt. Der Nährstoffrückgang schmälert die Produktivität des Sees.

der vom Kanton Bern erhobenen Abwasserabgabe nach der Reinigungsleistung der jeweiligen ARA. Als Massstab dient dabei die Konzentration an Nährstoffen im Auslauf der Kläranlage, wobei für jedes nicht zurückgehaltene Kilo Phosphor 30 Franken zu bezahlen sind. Diese Lenkungsabgabe hat die Betreiber der Kläranlagen – wie erwünscht – zur Optimierung der Phosphatfällung bewogen. Auf ein Jahr umgerechnet leben in der Region etwa 36'000 Einwohner und Feriengäste, die rund 9 Tonnen an gelöstem Phosphat die Toilette runterspülen. Davon halten die ARA im Einzugsgebiet des Brienzersees heute etwa 90 Prozent zurück.

Der Nährstoffrückgang im Brienzersee ist also nicht ein ungewollter Vorgang, sondern entspricht in seiner Entwicklung den Anforderungen des eidgenössischen Gewässerschutzgesetzes. Als von Natur aus sehr nährstoffarmes Gewässer war der See vor 1950 nie ein produktiver Lebensraum für Fische. Die heutige Nährstoffversorgung entspricht deshalb annähernd dem ursprünglichen Naturzustand. In der produktivsten Phase der 1970er- und frühen 1980er-Jahre gab es dagegen deutlich höhere Felchenerträge, weil mehr ungeklärtes Abwasser in den Brienzersee gelangte.

Phosphorrückhalt in den Stauseen

Das im Sommer anfallende Gletscherwasser hat einen hohen Schwebstoffgehalt, der einige 100 Milligramm je Liter ausmachen kann. Deshalb ist im Einzugsgebiet der Stauanlagen ein grosser Anteil des Phosphors an Partikel gebunden. Weil diese grösstenteils absinken und für immer im Sediment der Stauseen verbleiben, verschwinden auch die angelagerten Nährstoffe. Gemessen am jahrzehntelang prägenden Einfluss der Siedlungsentwässerung auf den Zulauf von biologisch ver-

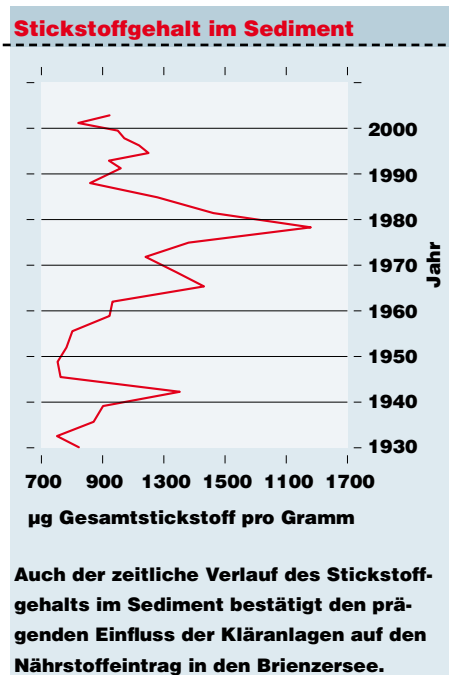
fügbarem Phosphat in den Brienzersee spielen die Stauseen der KWO jedoch eine untergeordnete Rolle. Sie halten pro Jahr etwa 2 Tonnen entsprechendes Phosphat zurück, das die Algen theoretisch verwerten könnten, wenn es ohne Rückhalt über die Aare abfliessen würde. Wenn die KWO in den Wintermonaten das im Sommer gespeicherte Wasser turbinieren, gelangen Trübstoffe und damit auch Phosphat in den Brienzersee. Die Algen können diesen Nährstoff dann aber nur teilweise verwerten, der Rest ist für die Primärproduktion verloren. Unter natürlichen Bedingungen würde dem pflanzlichen Plankton im Sommer somit etwas mehr Phosphat zur Verfügung stehen. Es handelt sich bei den winterlichen Verlusten jedoch um maximal 5 Prozent der gesamten Nährstoffmenge. Für die Jahresproduktion im See ist diese saisonale Umlagerung des Phosphateintrags folglich nicht bedeutend.

Spärliches Algenwachstum

Mit einer jährlichen Algenproduktion von 67 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter gedeiht im Brienzersee deutlich weniger pflanzliches Plankton als in anderen nährstoffarmen Seen der Schweiz, wie etwa im Thuner-, Walen- oder Vierwaldstättersee. Bezogen auf die Fläche produziert letzterer 160 Gramm Kohlenstoff je m², also mehr als das Doppelte. Für ein Gewässer mit einem mittleren Phosphatgehalt unter einem Mikrogramm pro Liter liegt der Brienzersee mit seiner geringen Biomasse allerdings im üblichen Rahmen. So findet man etwa in den weitgehend unberührten Seen der kanadischen Rocky Mountains ähnliche Verhältnisse.

Ein weiterer Grund für das beschränkte Algenwachstum ist – neben den sehr tiefen Nährstoffkonzentrationen – auch die Lichtabschwächung. Diese ist fast aus-

schliesslich auf grosse Frachten an mineralischen Schwebstoffen zurückzuführen, die mit den Zuflüssen aus dem vergletscherten Einzugsgebiet in den See gelangen. Durch die angeschwemmten Trübstoffe verfügen die Algen in den für sie produktiven Sommermonaten nur in der obersten Wasserschicht über genügend Licht. Weil das pflanzliche Plankton von der Sonneneinstrahlung abhängt, kann es nur bis in eine Tiefe von 10 Metern wachsen, was die Produktion der Biomasse im Vergleich zu anderen nährstoffarmen Seen noch weiter begrenzt.





Die Algenproduktion hängt nicht nur vom Nährstoffangebot ab, sondern wird auch durch das Licht begrenzt. Dessen Verfügbarkeit ist im Brienersee stark durch den Eintrag an Trübstoffen geprägt. Die Analyse der vielfältigen Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Ökosystem erforderte aufwändige wissenschaftliche Untersuchungen.

Saisonale Entwicklung der Algenproduktion

Wie in anderen Gewässern geht die Algenproduktion im Brienersee jeweils Ende Oktober stark zurück und weist in den Wintermonaten nur sehr geringe Werte auf. Obwohl das Wasser durch das allmähliche Absinken der Trübstoffe in dieser Jahreszeit klarer wird und das Sonnenlicht nun 20 bis 25 Meter tief in den See eindringt, kann das pflanzliche Plankton davon kaum profitieren. Wie bei den Landpflanzen lässt die geringe Sonneneinstrahlung nämlich kein bedeutendes Algenwachstum zu. Die Primärproduktion läuft jeweils erst im Frühling wieder richtig an.

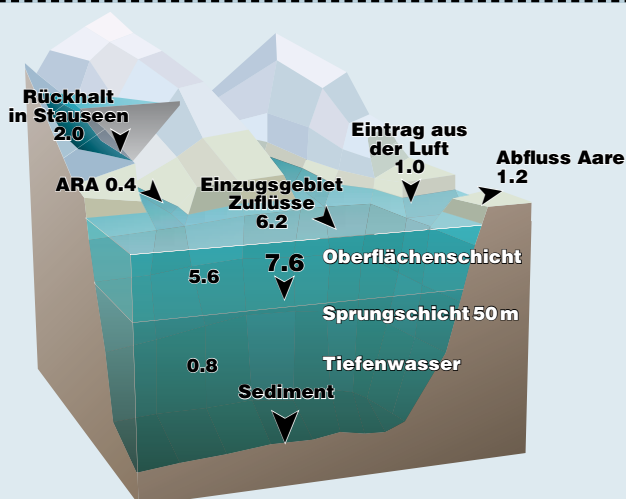
Dieser natürliche Jahreszyklus ist entscheidend für die Beurteilung der Lichtbeeinflussung durch den Kraftwerksbetrieb. Wie im Rahmen der Brienersee-Studie durchgeführte Messungen und Mo-

dellrechnungen zeigen, wird das Licht im See heute während der Sommermonate deutlich weniger abgeschwächt als unter natürlichen Umständen. Dies hängt damit zusammen, dass etwa zwei Drittel der früheren Schwebstofffracht der Aare in den Sedimenten der Stauseen zurückgehalten werden. Dadurch erhalten die Algen vor allem zur Zeit der Gletscherschmelze im Sommer mehr Licht, was die Primärproduktion in dieser Saison um gut ein Drittel erhöht.

Dagegen ist der Schwebstoffeintrag im Winter und Frühjahr als Folge der Stromproduktion grösser als im unbeeinflussten Zustand. Wie die Fachleute der Eawag ermittelt haben, wird das ohnehin eingeschränkte Algenwachstum durch die stärkere Wintertrübung von Januar bis März um etwa 16 Prozent verringert.

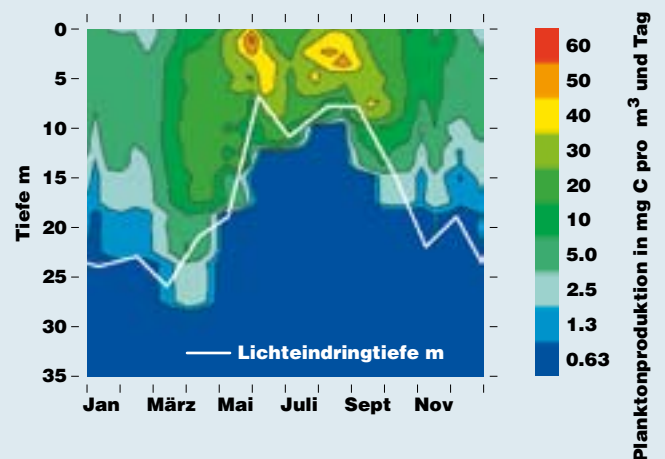
Allerdings unterliegt der saisonale Verlauf der Trübung den starken natürlichen Schwankungen in den Zuflüssen. Führen sie wenig Wasser – wie etwa in der Zeit vom Herbst 1995 bis Frühling 1997 –, so gelangen auch weniger Schwebstoffe in den Brienersee, was dessen Trübung verringert. Bei höheren Abflüssen hingegen – so etwa im Frühling 1999, im Hitzesommer 2003 oder während des Hochwassers vom August 2005 – wird auch die Oberflächentrübung erhöht.

Jährliche Bilanz des Phosphateintrags



Derzeit werden in den Stauseen pro Jahr etwa 2 Tonnen bioverfügbares Phosphat zurückgehalten. Knapp 8 Tonnen gelangen in den Brienersee. Davon wird ein Grossteil mit dem Absterben der Algen für immer im Sediment abgelagert.

Abhängigkeit der Planktonproduktion vom Licht



Im Sommer führen warme Temperaturen und intensive Sonneneinstrahlung zu einer maximalen Algenproduktion (orange/gelb). Weil in dieser Zeit viele Schwebstoffe aus den Zuflüssen das Wasser trüben, beschränkt sich das Planktonwachstum jedoch auf die obersten 10 Meter.

Geringer Einfluss der Kraftwerke auf die Algenproduktion

Seit dem Bau der Staumauern wird im Grimselgebiet ein Grossteil der Schwebstoffe in den Stauseen abgelagert.

Der saisonale und tägliche Abfluss der Aare wird seit den 1930er-Jahren wesentlich durch den Betrieb der Kraftwerke Oberhasli mitgeprägt. Mit ihren sieben Stauseen nutzen die KWO im Grimsel- und Sustengebiet fast zwei Drittel des Abflusses im gesamten Einzugsgebiet der Hasliaare. Der Rückhalt verändert die Wasserführung des Gebirgsflusses und hält Geschiebe sowie Schwebstoffe in den Stauseen zurück. Dadurch wird der Eintrag von Partikeln in den Brienersee verringert und zeitlich verlagert, was sich auf die Lichteindringtiefe auswirkt. Der Einfluss auf die jährliche Algenproduktion ist jedoch gering.

1932 haben die Kraftwerke Oberhasli KWO im Grimselgebiet ihre erste Stauanlage in Betrieb genommen. Nach dem Gelmersee stellten sie zwei Jahre später auch den deutlich grösseren Grimselsee fertig. 1950 folgten der Räterichsboden- und 1953 der Oberaarsee. Diese vier von insgesamt sieben Stauseen machen zusammen 95 Prozent des nutzbaren KWO-Speichervolumens von 197 Millionen Kubikmetern im Quellgebiet der Aare aus.

Der Höhenunterschied zwischen dem auf rund 2300 Meter über Meer gelegenen Oberaarsee und Innertkirchen, wo das turbinierete Wasser wieder in die Aare gelangt, beträgt fast 1700 Meter. Auf dem Weg dazwischen wird das gespeicherte Schmelz- und Regenwasser auf verschiedenen Höhenstufen in neun Kraftwerken mit insgesamt 26 Turbinen genutzt. Daraus resultiert im Durchschnitt der Jahre 2000 bis 2004 eine jährliche Stromgewinnung von 2250 Gigawattstunden, was 83 Prozent der Produktion im Atomkraftwerk Mühleberg entspricht. Seit 1980 nutzen

die KWO den Niveauunterschied von rund 400 Metern zwischen Grimsel- und Oberaarsee für den Pumpspeicherbetrieb. Dieser verbraucht im Mittel 700 Gigawattstunden pro Jahr, so dass sich die effektive Stromproduktion aus Wasserkraft abzüglich Pumpenergie auf etwa 1550 Gigawattstunden beläuft.

Veränderter Abfluss der Aare

Durch das Abschmelzen der im Hochgebirge gelagerten Schnee- und Eismassen fällt das Wasser im Einzugsgebiet der Hasliaare vor allem von Mai bis September an. Der Kraftwerksbetrieb hat ihren natürlichen Abfluss wesentlich verändert. So produzieren die KWO mehr als ein Drittel des Spitzenstroms aus den Speicherseen im Winter und entleeren dazu die Stauseen.

Das Geographische Institut der Universität Bern hat den natürlichen Abfluss der Aare mit einem hydrologischen Modell rekonstruiert und mit der aktuellen Situ-

ation verglichen. Dadurch lässt sich der Einfluss der Kraftwerke auf das Abflussgeschehen bestimmen. Durch die saisonale Verlagerung führt die Aare in der kälteren Jahreszeit gut zweimal soviel Wasser in den Brienersee wie vor dem Bau der Staumauern. Dagegen ist ihr Abfluss im Sommer durch den Rückhalt rund 12 Prozent geringer. Gemessen am gesamten Einzugsgebiet der Hasliaare, das bis zur Mündung in den Brienersee 603 Quadratkilometer umfasst, fliesst das Schmelz- und Niederschlagswasser einer Teilfläche von 353 km² zuerst in die Stauseen. Bezogen auf die Abflussmenge entspricht dies rund zwei Dritteln. Dadurch werden Hochwasserspitzen bei sommerlichen Starkniederschlägen gebrochen und die Wassermassen in den alpinen Speichern zwischengelagert, sofern die Stauseen zum Zeitpunkt eines Ereignisses noch über ausreichende Kapazitäten verfügen.



Die grossen Stauseen im Einzugsgebiet der Aare: Oberaar- (oben), Grimsel-, Räterichsboden- und Gelmersee.



Eine Pelton turbine im Kraftwerk Innertkirchen: Wie aufwändige Untersuchungen im Rahmen der Brienersee-Studie zeigen, hat die Elektrizitätsproduktion keinen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der Partikel.

Grosser Rückhalt an Feststoffen in den Stauseen

Der Rückhalt des Wassers in den Stauseen hat auch beträchtliche Auswirkungen auf den Schwebstofftransport der Aare. Laut Messungen der ETH-Geologen und Berechnungen der Eawag-Fachleute würde der Fluss ohne Kraftwerknutzung jährlich gegen 360'000 Tonnen Partikel in den Brienersee schwimmen. Davon stammen gut 75 Prozent vom natürlichen Gletscherschliff. Zwischen 1997 bis 2004 betrug der bei der Aaremündung von der Landeshydrologie gemessene Eintrag jedoch nur etwa 128'000 Tonnen pro Jahr, was noch gut einem Drittel der ursprünglichen Fracht entspricht. Grund für die stark verringerte Partikelfracht sind die Stauseen, in denen 232'000 Tonnen Geschiebe und Schwebstoffe zurückgehalten werden. Hier sinken die gröberen Partikel auf den Grund und bilden Sedimente

in den Stauseen, ohne je den Brienersee zu erreichen. Deshalb spült das von den KWO turbinierete Wasser in Innertkirchen heute bloss noch etwa 39'000 Tonnen Schwebstoffe in die Aare.

Unbeeinflusste Lütschine

Im Gegensatz zur Aare ist das Abflussregime der Lütschine praktisch natürlich. Durch die tiefen Wintertemperaturen wird der Niederschlag im alpinen Einzugsgebiet, das zu gut einem Sechstel vergletschert ist, in Form von Schnee und Eis zwischengespeichert. Deshalb führt der zweite wichtige Zufluss im Winter nur wenig Wasser und kaum Schwebstoffe. Vom Frühjahr bis in den Spätsommer prägen zuerst die Schnee- und später die Gletscherschmelze sowie häufig auch Starkniederschläge den deutlich erhöhten Abfluss. Zwischen April und Oktober transportiert die Lütschine so gut 98 Prozent

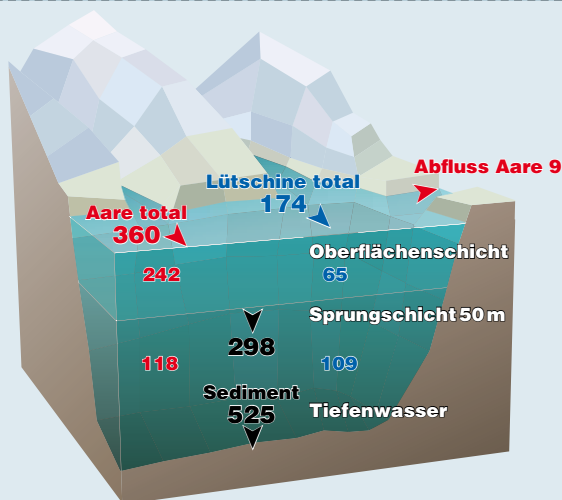
ihrer jährlichen Schwebstofffracht von 174'000 Tonnen in den Brienersee. Damit schwemmt sie trotz ihrem 40 Prozent kleineren Einzugsgebiet 36 Prozent mehr Partikel ein als die von den KWO beeinflusste Hasliaare.

Verteilung der Schwebstoffe im Brienersee

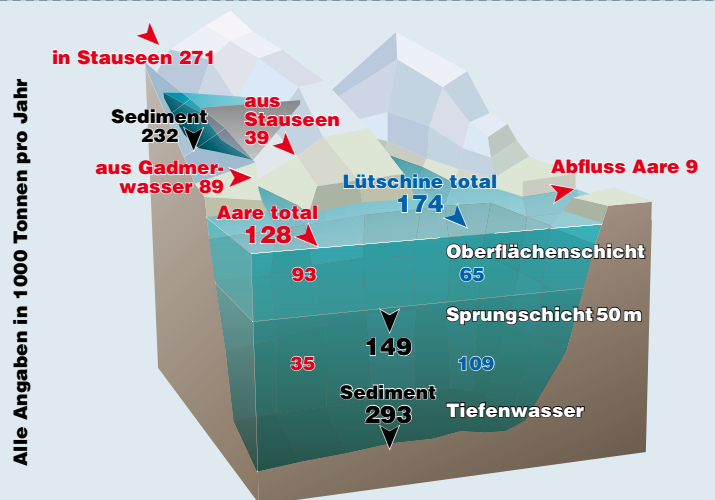
Die Jahresfracht der Schwebstoffe sagt allerdings wenig über deren Wirkung im See aus. Entscheidend für die Primärproduktion und das Leben im See ist vielmehr die Menge und Grösse jener Partikel, welche in die Oberflächenschicht eingetragen wird. Erhöhte Konzentrationen von Schwebstoffen in der obersten Wasserschicht schwächen das Sonnenlicht ab, was sich wiederum negativ auf das Algenwachstum auswirkt.

Im Vergleich zur Aare taucht die Lütschine drei bis vier Mal öfter ins Tiefenwasser

Partikelbilanz vor dem Bau der Stauseen



Heutige Partikelbilanz im Einzugsgebiet



Vor dem Bau der Staumauern transportierte die Aare jährlich etwa 360'000 Tonnen Partikel in den Brienersee – heute sind es noch 128'000 Tonnen. Der Rest sedimentiert in den Stauseen. Die Frachten der unbeeinflussten Lütschine haben sich nicht verändert. Für die Trübung des Sees ist nur der Eintrag in die Oberflächenschicht massgebend. Früher waren dies rund 307'000 Tonnen, von denen 9 Tonnen über die Aare abflossen. Inzwischen gelangt noch etwa die Hälfte der Partikel in die Oberflächenschicht.



Durch Erosion und Abschwemmung werden im Einzugsgebiet der Grimselstauseen jährlich etwa 270'000 Tonnen mineralische Partikel unterschiedlicher Grösse mobilisiert. Wie Untersuchungen zeigen, verbleiben davon 232'000 Tonnen in den Stauseen. Dadurch ist der Brienzensee heute vor allem im Sommer klarer als vor dem Bau der Staumauern.

des Brienzesees ab. Hauptgründe dafür sind ihr höherer Salzgehalt und häufigere Hochwasserereignisse, die grosse Mengen an Schwebstoffen mitschwemmen und das Flusswasser damit schwerer machen. Dadurch werden jährlich 109'000 Tonnen oder nahezu 63 Prozent ihrer gesamten Partikelfracht relativ rasch ins Tiefenwasser eingetragen – vor allem im Bereich des Lütschinedeltas. Gemäss den Erkenntnissen der Eawag-Fachleute gelangen über die Lütschine folglich nur zirka 65'000 Tonnen Schwebstoffe in die obersten 50 Meter des Sees.

Dagegen schichtet sich die Aare im Mittel höher ein und führt – wegen dem Rückhalt von Starkniederschlägen in den Stauseen – auch seltener Hochwasser. Deshalb gelangen nur 35'000 Tonnen oder gut 27 Prozent ihres Schwebstoffeintrags umgehend ins Tiefenwasser des Brienzesees. Die Aare transportiert also in einem durchschnittlichen Jahr 93'000 Tonnen Partikel in die Oberflächenschicht des Sees und übertrifft die entsprechende Zufuhr der Lütschine somit deutlich.

Dominanter Einfluss der Aare auf die Trübung

Obwohl beide Zuflüsse wesentlich zur Trübung der obersten Wasserschichten im Brienzensee beitragen, prägt die Aare den Schwebstoffeintrag bis in eine Tiefe von 50 Metern stärker – und zwar sowohl im Sommer als auch im Winter.

Der Kraftwerksbetrieb bewirkt eine zeitliche Verteilung ihrer Partikelfracht über das ganze Jahr. Als Folge der Stromproduktion transportiert die Aare in einem mittleren Winter heute etwa 14'000 Tonnen Schwebstoffe in den Brienzensee – das sind 11'000 Tonnen mehr als vor dem Bau der Stauseen. Dagegen ist ihr Partikeleintrag in den Sommermonaten um über 200'000 Tonnen geringer, weil ein Gross-

teil der Schwebstoffe in den Speichern zurückgehalten wird. Der gesamte jährliche Rückhalt von 232'000 Tonnen Feststoffen wirkt sich also überwiegend auf den Eintrag im Sommer aus. Dadurch ist der Brienzensee in dieser Jahreszeit heute deutlich weniger trüb als früher, so dass sich die Lichtverfügbarkeit verdoppelt hat, wie Messdaten und Modellrechnungen zeigen. Im Vergleich zur Situation vor dem Bau der Staumauern hat dagegen die Trübung im Winter leicht zugenommen, und die Lichtverfügbarkeit ist auf die Hälfte gesunken.

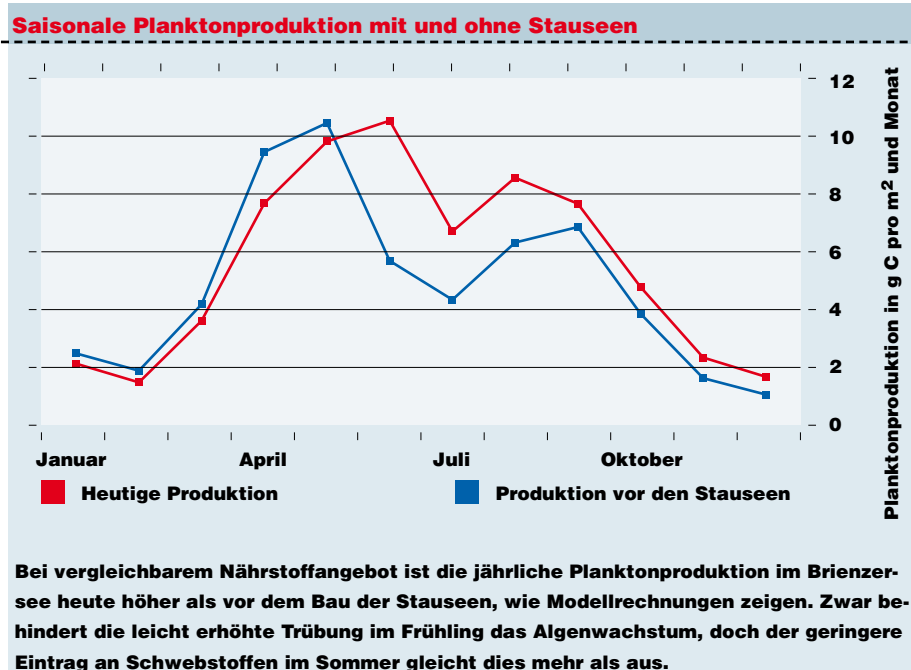
Kritische Zeit im Frühling

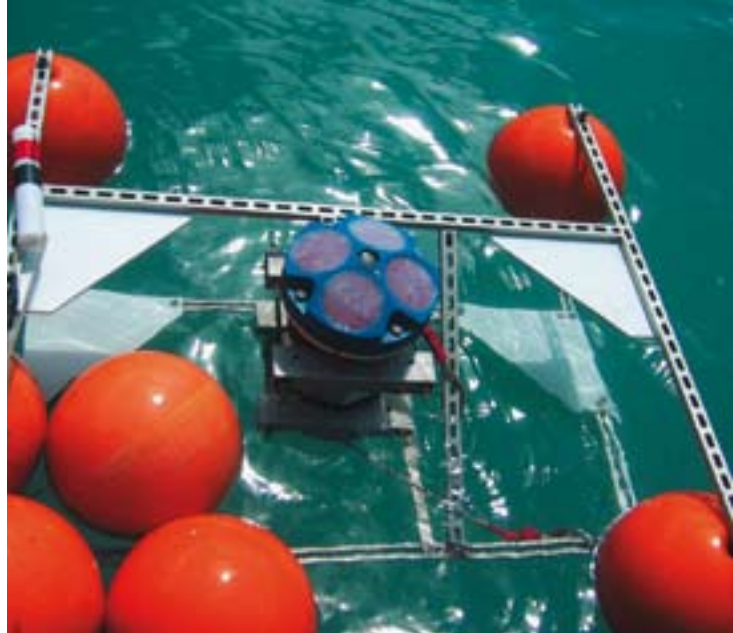
Im Vergleich zu grösseren Feststoffen, die vor allem im Sommer zur Trübung beitragen und höchstens drei Wochen in der Oberflächenschicht verbleiben, kann die Aufenthaltszeit der in den Wintermonaten eingetragenen kleinen Schwebstoffe 40

Tage überschreiten. In den ersten Frühlingsschritten, wenn mit der zunehmenden Sonneneinstrahlung das Algenwachstum einsetzt, ist die Lichtversorgung des pflanzlichen Planktons durch die Wintertrübung leicht eingeschränkt, was die Primärproduktion im See vermindert. Allerdings wird dieser Effekt häufig durch starke natürliche Schwankungen im Frühling – wie heftige Niederschläge oder das unterschiedliche Einsetzen der Schneeschmelze – überdeckt.

Grosse Partikel bleiben in den Stauseen

Das Eis des Oberaar- und Unteraargletschers sowie die Gletscherflüsse erodieren den kristallinen Untergrund. Zusammen mit den Abschwemmungen in den Gletschervorfeldern werden im Einzugsgebiet der Aare dadurch jährlich etwa 270'000 Tonnen mineralische Partikel un-





Vor allem in den Sommermonaten schwemmt die Lütschine – hier im Mündungsbereich – grosse Mengen an Trübstoffen in den Brienersee. Weil sie häufig ins Tiefenwasser abtaucht, wird die Seetrübung aber stärker durch die Aare beeinflusst, wie Messungen gezeigt haben.

terschiedlicher Grösse mobilisiert. Da deren Sinkgeschwindigkeit mit ihrer Grösse zunimmt, sedimentieren entlang der Fliesstrecke vom Gletschertor bis zum Brienersee immer zuerst die gröberen Feststoffe. Im Wasser unterhalb der Stauseen finden sich deshalb fast ausschliesslich kleine Schwebstoffe, die im Brienersee nur langsam absinken.

Mit Hilfe modernster Technik hat die Wissenschaft die Korngrössen im Sediment des Grimselsees bestimmt. Vor dem Gletscherzufluss beträgt die durchschnittliche Korngrösse etwa 16 Mikrometer (μm), in der Mitte des Stausees sind es zirka 9 μm und vor der Staumauer nur ungefähr 6 μm . Da vor allem die grossen Partikel absinken, sind die Korngrössen im Wasser des Stausees deutlich kleiner.

Kleine Schwebstoffe gelangen in den Brienersee

Während der intensiven Gletscherschmelze im Hochsommer betragen die mittleren Korngrössen der Partikel in den KWO-Ausflüssen bei Innertkirchen etwa 4 μm . In den Wintermonaten hingegen, wenn kein Eis mehr schmilzt und die grösseren Feststoffe auf den Grund des Grimselsees gesunken sind, beträgt die durchschnittliche Grösse nur noch gut 1 μm .

Durch die intensive Pumpspeicherung zwischen Grimsel- und Oberaarsee werden die Schwebstoffe im Wasser der Stauseen seit 1980 etwa 20 Mal pro Jahr durch die Pumpen und Turbinen geleitet. Würden die Schaufelräder der Turbinen diese Partikel in erheblichem Ausmass zerkleinern, müsste die mittlere Korngrösse im Sediment des Grimselsees nahe der Staumauer seit 1980 abgenommen haben. Allerdings ergeben Untersuchungen von Sedimentkernen seit Inbetriebnahme des Stausees in den frühen 1930er-Jahren keine Änderungen der Korngrössen.

Diese Resultate bestätigen Befunde einer früheren ETH-Studie, wonach die Turbinen die feinen Schwebstoffe nicht zerkleinern. Auch Stichprobenmessungen der besonders kleinen Kolloide mit Korngrössen unter 1 μm durch Fachleute der Universität Genf zeigen keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Gletscherzungen, dem Grimsensee und den KWO-Ausflüssen. Daraus lässt sich folgern, dass

die Kolloide ihr Absetzverhalten zwischen dem Zufluss in die Stauseen und der Wasserrückgabe in Innertkirchen nicht wesentlich verändern. Weil sie nicht sedimentieren, würden sie den Brienersee ohnehin erreichen. Selbst eine allfällige Zerkleinerung durch die KWO-Turbinen bliebe ohne Wirkung, da Kolloide unter einer Korngrösse von 0,5 μm praktisch keinen Einfluss auf das Licht im See mehr haben.

Starke Verdünnung kleinster Partikel



Das von den KWO turbinierte trübe Wasser (links) gelangt bei Innertkirchen in die Hasliaare (rechts). Dadurch wird der Eintrag von Schwebstoffen in den See im Winter erhöht.

Kolloide sind kleinste Partikel mit einer Grösse von weniger als 1 Mikrometer, die in vermindertem Mass ebenfalls zur Trübung des Brienersee beitragen. Sie gelangen über Aare und Lütschine in das Gewässer, sinken praktisch nicht ab und verlassen den See zu einem grossen Teil über den Abfluss der Aare. Als Folge des Kraftwerksbetriebs schwemmt die Aare im Winter unnatürlich viele Kolloide in den See, während aus der Lütschine dann praktisch keine solchen Kleinstpartikel kommen.

Weil das Seewasser in den Wintermonaten jedoch über grosse Tiefen gut durchmischt ist, werden die eingetragenen Kolloide stark verdünnt. Ihre Konzentration in der Oberflächenschicht ist für die Algenproduktion deshalb nicht von ausschlaggebender Bedeutung.

Um zu sedimentieren, müssen sich Kolloide zusammenballen. Für diese gegenseitige Anlagerung braucht es unter anderem organische Bestandteile wie zum Beispiel Abbauprodukte von Algen und Bakterien. Deren Konzentrationen sind im Brienersee extrem tief. Wie Versuche der Universität Genf gezeigt haben, hat auch eine Vervierfachung der organischen Abbauprodukte das Zusammenballen der Kleinstpartikel nicht wesentlich erhöht. Diese wissenschaftliche Simulation bildet ungefähr die Verhältnisse in den 1970er-Jahren nach. Daher dürfte der Brienersee auch um 1970 nicht wesentlich klarer gewesen sein. Es ist aber denkbar, dass sich seine Farbe seither wegen der geringeren Algendichte verändert hat.

Keine Abstriche beim Gewässerschutz



Netzkäfige am Thunersee zur Aufzucht von Felchenbrütlingen aus dem Brienersee.

Die im Auftrag des Kantons Bern durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen tragen zu einem besseren Verständnis des Ökosystems Brienersee bei. Sie zeigen deutlich, dass die beobachteten Veränderungen beim Plankton und bei den Felchen unmittelbar mit dem Nährstoffrückgang im Gewässer zusammenhängen. Hauptgrund für den massiv reduzierten Eintrag von Phosphor und Stickstoff in den See sind die jahrzehntelangen Anstrengungen beim technischen Gewässerschutz.

Dank einem gut ausgebauten Kanalisationsnetz, effizienten Kläranlagen und politischen Massnahmen – wie dem 1986 eingeführten Phosphatverbot für Waschmittel – sind unsere Gewässer heute nicht mehr so überdüngt wie noch in den 1970er-Jahren. Auch der Brienersee hat inzwischen wieder das tiefe Belastungsniveau von 1950 erreicht.

Keine künstliche Erhöhung der Phosphatzufuhr

Für ein von Natur aus äusserst nährstoffarmes Gewässer hat dieser Erfolg freilich auch eine Schattenseite. Das geringere Nährstoffangebot schränkt das ohnehin bescheidene Algenwachstum ein und schmälert die Nahrungsgrundlage des Zooplanktons, wodurch auch die Felchen im Brienersee weniger Futter finden. Die zwei verbleibenden Berufsfischer können deshalb nicht mehr mit Fangzahlen wie in früheren Jahren rechnen.

Auf Grund der auch in anderen Schwei-

zer Seen rückläufigen Erträge haben verschiedene Kreise wiederholt die Forderung gestellt, den Phosphoreintrag in die Gewässer durch eine Reduktion der Reinigungsleistung von Kläranlagen künstlich zu erhöhen. Konkret schlagen sie ein Abstellen der dritten Reinigungsstufe vor, die den entscheidenden Nährstoff Phosphat weitgehend aus dem Abwasser entfernt. Eine Umsetzung dieser umstrittenen Massnahme bei allen ARA im Einzugsgebiet des Brienersees würde den Eintrag von biologisch verfügbarem Phosphat aus der Siedlungsentwässerung in die Zuflüsse ungefähr verzehnfachen. Der hohe Nährstoffgehalt der 1970er-Jahre liesse sich freilich auch damit nicht mehr erreichen.

So verständlich der Wunsch nach höheren Fangertträgen auch ist, entspricht er doch nur einem von vielen Nutzungsansprüchen an das Ökosystem Brienersee. Der Kanton hat die Aufgabe, das öffentliche Interesse gegenüber Einzelinteressen zu verteidigen und auf der Grundlage geltender Vorschriften auch durchzusetzen. Eine Reduktion der Reinigungsleistung bestehender Kläranlagen im Interesse von höheren Fischerträgen würde dem Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer klar widersprechen. Deshalb lehnt der Kanton diese Massnahme entschieden ab.

Fischereiliche Massnahmen

Um die Fischerei zu stützen, hat der Kanton bereits 2002 die Kapazität der Netz-

Der Kanton Bern lehnt Abstriche beim technischen Gewässerschutz zur Erhöhung der Fischerträge im Brienersee klar ab. Aus ökologischer Sicht ist die rückläufige Nährstoffbelastung erfreulich. Eine bewusste Reduktion der Reinigungsleistung in den Kläranlagen des Einzugsgebiets kommt für die Behörden deshalb nicht in Frage.

käfiganlage zur Aufzucht im Gütetal am Thunersee verdoppelt. Dieser Ausbau ermöglichte eine markante Steigerung des Einsatzes von Felchensömmerlingen im Brienersee. Damit müssen sich jedoch mehr Fische das wenige vorhandene Fut-



Der Kanton lehnt Abstriche beim Gewässerschutz zur Erhöhung der Fischfangertträge ab. Die Felchenbestände werden aber mit fishereilichen Massnahmen gestützt.

ter im See teilen. Auf Grund der heutigen Erkenntnisse bleibt daher offen, inwiefern diese Massnahme den Felchenbestand stützt. Die Finanzierung der Netzkäfiganlage ist noch bis 2007 gesichert. Über diesen Zeitpunkt hinaus sind deren Unterhalt und Betrieb nicht garantiert.

Zur besseren Nutzung der kleinwüchsigen Brienzligbestände hat das Fischereiinspektorat auf anfangs 2006 neue Fangvorschriften erlassen, die unter anderem eine Reduktion von Fangmindestmass und Netzmaschenweiten sowie eine Anpassung der Schonzeiten umfassen.

Die bestehende Überwachung – sowohl des Brienzlersees und seiner Trübung, wie auch der Felchenfänge – hat sich bewährt. Fundierte Aussagen über die Entwicklung des Gewässerzustandes und der Fischbestände sind nur dank den langjährig erhobenen Daten möglich. Die externen Fachleute empfehlen den kantonalen Fachstellen deshalb, dieses Monitoring weiterzuführen und dabei künftig auch die Brienzligfischerei einzubeziehen. Weitergeführt wird auch die Optimierung der Seespiegelregulierung.

Geringer Einfluss der KWO

Der Kraftwerkbetrieb der KWO im Grimselgebiet verändert zwar den saisonalen Verlauf der Schwebstofffrachten sowie der Seetrübung, hat laut den Erkenntnissen der Wissenschaft aber nur einen sehr



Zur besseren Nutzung der kleinwüchsigen Brienzlig gelten seit 2006 neue Netzmaschenweiten.

beschränkten Einfluss auf die Lebensgemeinschaften im Brienzlersee. Insbesondere reduziert die deutlich erhöhte Partikelzufuhr im Winter das Wachstum von Algen und Zooplankton nicht massgeblich. Dominierender Faktor ist vielmehr die stark rückläufige Nährstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet. Aus Sicht der Gewässerökologie drängen sich deshalb auch keine Massnahmen für eine Reduktion der aktuellen winterlichen Seetrübung auf. Für den kantonalen Lenkungsausschuss ist die umfassende Brienzlersee-Studie

bewusst nicht Bestandteil der Umweltabklärungen für die verschiedenen Ausbauprojekte von KWO plus. Die Resultate der Untersuchungen können jedoch als fundierte Grundlage für die Beurteilung der Projektauswirkungen und für den Umweltbericht dienen.

Die Restwassersanierung im gesamten Einzugsgebiet der KWO erfolgt ebenfalls unabhängig von der vorliegenden Studie im Rahmen des laufenden Gewässersanierungskonzepts.

Serviceangaben

Die wissenschaftlichen Grundlagen

Einzugsgebiet

- Veränderung der Hydrologie der Aare. Modellierung des natürlichen Abflusses der Aare, Pegel Brienzwiler, von 1921 bis 2004; Michael Sägesser, Rolf Weingartner; Geographisches Institut der Universität Bern, wein@giub.unibe.ch
- Feststoffrückhalt in den Stauseen; Flavio Anselmetti, Geologisches Institut der ETH Zürich, flavio@erdw.ethz.ch

Fische

- Beziehungsnetz Fische – Zooplankton; Arthur Kirchhofer und Martina Breitenstein, WFN Gümmenten, info@wfn.ch, Rudolf Müller, Eawag, rudolf.mueller@eawag.ch

Daphnien

- Die Daphnien des Brienzlersees. Unter besonderer Berücksichtigung des Hochwasserjahres 1999; Christian Rellstab, Eawag, christian.rellstab@eawag.ch; Piet Spaak, Eawag, piet.spaak@eawag.ch

Nährstoffe, Primärproduktion

- GIS-gestützte Abschätzung der Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer im Einzugsgebiet des Brienzlersees; Volker Prasuhn, Agroscope FAL Reckenholz, volker.prasuhn@fal.admin.ch
- Eintrag von gelöstem Phosphor; Thomas Haltmeier, Bonnard + Gardel Ingenieure AG, Bern thomas.haltmeier@bg-21.com
- Auswirkungen des Schwebstoffhaushaltes auf die Primärproduktion des Brienzlersees; David Finger, Eawag, fingerda@eawag.ch; Lorenz Jaun, Eawag, lorenz.jaun@eawag.ch
- Entzug von Nährstoffen durch Adsorption an Schwebstoffen und Kolloiden; Beat Müller, Eawag, beat.mueller@eawag.ch

Trübstoffe, Kolloide

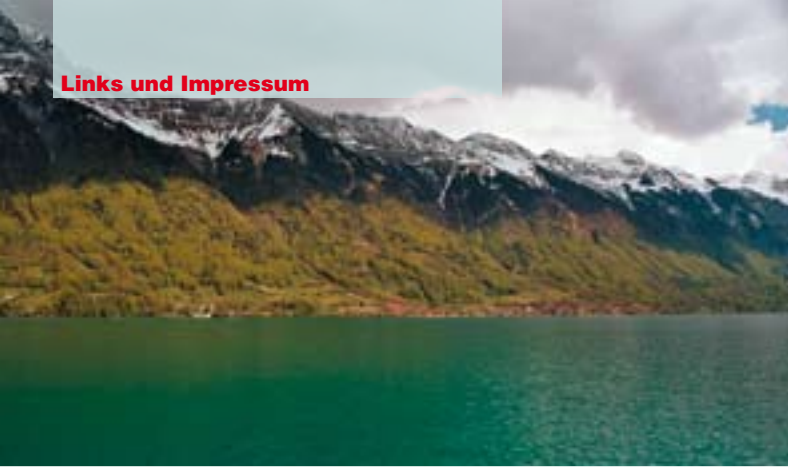
- Verminderte Beseitigung mineralischer Partikel; Montserrat Filella, Universität Genf, Montserrat.Filella@cabe.unige.ch; Vincent Chanudet, Universität Genf, vincent.chanudet@cabe.unige.ch

Grafiknachweis:

Volker Prasuhn, FAL Reckenholz: 5; Béatrice Gysin, Biel: 7 (Felchen); Kantonales Fischereiinspektorat: 7, 8 I.; WFN Gümmenten: 8 r., 9 r.; Rudolf Müller, Eawag: 9 I.; GSA, GBL: 11, 13; Christian Rellstab, Eawag: 12; Thomas Haltmeier, B+G, Bern: 15; Beat Müller, Eawag: 16, 17 I.; David Finger, Eawag: 17 r., 19, 20

Bildnachweis:

Daniel Scheidegger, GSA, GBL: 1 oben; Christian Rellstab, Eawag: 1 u. I., 3 o. I., 3 o. m., 3 u. m., 11, 12 o. r., 12 u., 13 I., 16 o. I., 16 u., 20 r., 21 o. I., 21 o. r., 24 o. I., 24 o. r., 24 u. I.; David Bittner, Universität Bern: 1 u. r., 3 u. I., 6, 7, 8 I., 23; David Finger, Eawag: 3 o. r., 10, 15, 17 I., 18, 20 I., 21 u., 24 u. r.; Markus Zeh, GSA, GBL: 3 u. r., 12 o. I., 14, 16 o. r., 22 o., 22 m.; Schweizer Luftwaffe: 4; Elisabeth Abegglen, Iseltwald: 8 r.; Rudolf Müller, Eawag: 9; Kantonspolizei Bern: 13 r.; Daniel Steiner, Eawag: 17 I.; Daniela Richter, Eawag: 17 r.; KWO, Innertkirchen, © Robert Bösch, Oberägeri: 19; Anton Rügger, GSA: 22 u.



Links

www.eawag.ch/brienzersee

Die wissenschaftlichen Grundlagen

Die Eawag – das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs – informiert auf ihrer Website umfassend über die Resultate des 2001 gestarteten interdisziplinären Forschungsprojekts. Hier findet man unter anderem alle Teilberichte der Brienzersee-Studie sowie weitere wissenschaftliche Grundlagen und Artikel.

www.gsa.bve.be.ch >

Gewässerqualität > Seen > Berichte Umsetzung des Gewässerschutzes

Als kantonale Vollzugsstelle ist das Gewässerschutzamt für die Umsetzung der Gewässerschutzvorschriften und die Umweltbeobachtung der bernischen Seen zuständig. Auf seiner Homepage findet man die Ergebnisse der im Einzugsgebiet des Brienzersees durchgeführten Vorstudien und Forschungsberichte.

www.umwelt-schweiz.ch >

Themen > Hydrologische Daten

Die hydrologischen Daten

Die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt betreibt vor allem an Flüssen und Seen über 300 Messstationen zur Erhebung von hydrologischen Daten – so auch an der Aare bei Brienzwiler, an der Lütchine in Gsteig sowie am Brienzersee in Ringgenberg. Erfasst werden unter anderem Wasserstände, Abflüsse und Temperaturen.

www.be.ch/Fischerei

Nachhaltige Nutzung der Fischbestände

Das kantonale Fischereinspektorat kümmert sich unter anderem um die Erhaltung und Förderung der Vielfalt an einheimischen Fischen. Es bewirtschaftet die staatlichen Gewässer mit dem Ziel einer nachhaltigen Nutzung der Fischbestände. Auf den Einbruch der Felchenpopulationen im Brienzersee hat es mit verschiedenen fischereilichen Massnahmen reagiert.

www.bkfv-fcbp.ch > Aktuell

> Brienzersee-Trübung

Die Sicht der Fischer

Als Dachverband der bernischen Fischereivereine und ihrer regionalen Zusammenschlüsse vertritt der Bernisch Kantonale Fischerei-Verband BKFV die Interessen der Fischer. Die Website listet verschiedene Berichte und Artikel zum Felchenrückgang im Brienzersee auf.

www.grimselstrom.ch

Details zum Kraftwerksbetrieb

Im Einzugsgebiet der Hasliaare werden fast zwei Drittel des Wassers für die Stromproduktion genutzt. Die Homepage der Kraftwerke Oberhasli KWO bietet Details zum Kraftwerksbetrieb mit zahlreichen Informationen und Karten zu den Stauanlagen, die auch Auswirkungen auf den Brienzersee haben.

Impressum

Herausgeber: Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern BVE, Reiterstrasse 11, 3011 Bern; Volkswirtschaftsdirektion VOL, Münsterplatz 3a, 3001 Bern

Projektleitung: Markus Zeh, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern GSA, Gewässer- und Bodenschutzlabor GBL

Lenkungsausschuss Brienzersee: Renate Amstutz, Generalsekretärin BVE (Leitung); Fritz Abegglen / Hansruedi Lüthi, Vertreter der Brienzersee-Gemeinden, Iseltwald; Peter Friedli, Fischereinspektorat Bern; Raymond Kocher, Wasserwirtschaftsamt, Bern; Hans Michel, Pachtvereinigung Interlaken; Ueli Ochsenbein, GSA, GBL, Bern; Roland Seiler, Bernisch Kantonaler Fischerei-Verband; Gianni Biasiutti, Wilhelm Regez, Heinz Peter Tscholl, Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen; Markus Zeh, GSA, GBL, Bern

Finanzierung: Folgende Geldgeber haben das Forschungsprojekt mit ihren Beiträgen unterstützt: Kanton Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU, Kraftwerke Oberhasli KWO, Brienzersee-Gemeinden

Expertengruppe: Alfred Wüest (Leitung), Hansrudolf Bürgi, Rudolf Müller, alle Eawag; Adrian Jakob, BAFU; Peter Huggenberger, Universität Basel

Fachliche Begleitung Broschüre: Peter Bossard, David Finger, Lorenz Jaun, Beat Müller, Rudolf Müller, Christian Rellstab, Piet Spaak, Michael Sturm, Alfred Wüest, alle Eawag; Martina Breitenstein, Arthur Kirchhofer, WFN, Gümmenen; Montserrat Filella, Universität Genf; Markus Zeh, GSA, GBL, Bern

Konzept, Text und Produktion: Beat Jordi, Biel

Visuelle Gestaltung und Layout: Beat Trummer, Biel

Redaktionsschluss: 31. März 2006

Copyright: Der Nachdruck der Texte mit Quellenangabe und Belegexemplar an den Herausgeber ist erwünscht.

Internet: Die Broschüre „Brienzersee: Ein Ökosystem unter der Lupe“ ist im PDF-Format auf der Internetseite des GSA verfügbar: www.gsa.bve.be.ch > Gewässerqualität > Seen > Berichte

Bild- und Grafiknachweis: siehe Seite 23