Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 96 (2004)
Heft: 5-6

Artikel: Trübeströme im Grimselsee
Autor: Bühler, Johannes / Siegenthaler, Christoph / Simitovic, Rusten
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939567

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: 23.08.2025

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

Trübeströme im Grimselsee

Johannes Bühler, Christoph Siegenthaler, Rustem Simitovic, Alfred Wüest, Markus Zeh

Zusammenfassung

Seit etwa zwei Jahrzehnten wird von Fischereikreisen darauf hingewiesen, dass die Fischfänge im Brienzersee zurückgegangen seien, was vor allem auf eine Zunahme der Seetrübung zurückzuführen sei. Da ein wesentlicher Teil der Schwebstoffe im See aus dem Grimselgebiet stammt, stellte sich auch die Frage, ob die Seetrübung durch den Ausbau der Wasserkraftnutzung der Aare im oberen Haslital im Laufe der Zeit verändert worden sei. Dem Grimselsee kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, weil sich in ihm ein Grossteil der vom mächtigen Unteraargletscher gelieferten Sedimente absetzt, statt weiter talabwärts zu fliessen. Um die interne Dynamik des Sees im Hinblick auf den Sedimenttransport besser zu verstehen, führten wir 2000 und 2001 eine Messkampagne zur Erfassung der Trübe in seinem Abfluss sowie der seeinternen Temperaturverteilung durch. Es zeigte sich, dass das Geschehen im Oberflächenwasser des Stausees – ähnlich wie in natürlichen Seen – weitgehend von meteorologischen Einflüssen abhängt. Im Tiefenwasser wird die Dynamik von Trübeströmen dominiert, welche auf zwei verschiedene Arten erzeugt werden. Im Sommer und Herbst 2000 waren sie bedingt durch sedimenthaltige Gletscherabflüsse als Folge von Starkregen und Wärmeperioden, also ebenfalls durch die Witterung. Ausserdem traten aber im Frühling 2001 bei niedrigem Seestand Trübeströme auf, die mit dem Pumpbetrieb an Wochenenden im Zusammenhang standen.

1. Einleitung

Der Grimselstausee liegt 80 km ostsüdöstlich von Bern im obersten Bereich des Einzugsgebiets der Aare, dem Haslital. Die Stauanlage wurde in den 30er-Jahren von den Kraftwerken Oberhasli (KWO) gebaut, um die grossen Aareabflüsse während der warmen Jahreszeit zur Stromproduktion im Winter zurückzuhalten, statt sie ungenutzt in den Brienzersee fliessen zu lassen (Bild 1). Der Abfluss des Sees wurde durch einen Stollen zum Gelmersee geleitet und im Kraftwerk Handeck 1 verarbeitet. Seither sind zwei weitere grössere Speicherseen in Betrieb genommen worden, der Oberaar- und der Räterichsbodensee. Ein Teil des Wassers aus dem Grimselsee und aus dem Oberaarsee wird jetzt im Kraftwerk Grimsel 1 turbiniert und anschliessend in den Räterichsbodensee abgeleitet (Bild 1). Zusätzlich wurde 1980 das Umwälzwerk Grimsel 2 erstellt. Dort wird einerseits an Werktagen Wasser vom Oberaarsee in den Grimselsee turbiniert, um hochwertige Spitzenenergie zu erzeugen (schwarzer Pfeil in Bild 1), anderseits wird in Schwachlastzeiten – nachts und an Wochenenden – mittels preisgünstiger Bandenergie etwa gleich viel Wasser wieder hinaufgepumpt (weisser Pfeil in Bild 1). Der Grimselsee ist bei Vollstau auf Kote 1909 m ü.M. vor der Spittellammsperre etwa 90 m tief. Bei diesem Stauziel beträgt die Seeoberfläche 2,7 km^2 und der Nutzinhalt 94 Mio. m^3.

Durch die Inbetriebnahme dieser Stauhaltungen wurde nicht nur das Abflussregime der Aare, sondern auch die Grösse der aus dem Grimselgebiet transportierten Sedimentfracht verändert. Einerseits werden Sedimente in den Stauseen abgelagert, andererseits wird ein Teil der Fracht vom Sommer zum Winter verschoben. Zudem werden durch die ausgleichende Wirkung der Stauhaltungen auf Hochwässer auch die Korngrössen der in den Brienzersee mitgeführten Schwebstoffe und die Spitzenwerte des Sedimenttransports reduziert.

Für den Sedimenttransport ins untere Haslital spielt der Grimselsee infolge seiner Grösse und zentralen Lage eine besondere Rolle. Er ist im kristallinen Untergrund eingebettet und wird vom mächtigen Unteraargletscher gespeist, der eine beträchtliche Fracht an Geschiebe und Schwebstoffen liefert. Während sich die gröberen Sedimentfraktionen im See selbst absetzen, bleibt ein Teil der Feinstoffe in Suspension und fliesst in die unteren Kraftwerkstufen ab. Die interne Dynamik des Sees bestimmt so massgebend die Grösse der Schwebstofffracht, die schliesslich in den Brienzersee gelangt. Ein gutes Verständnis dieser Dynamik ist auch eine Grundlage zur Planung künftiger betrieblicher und baulicher Veränderungen.

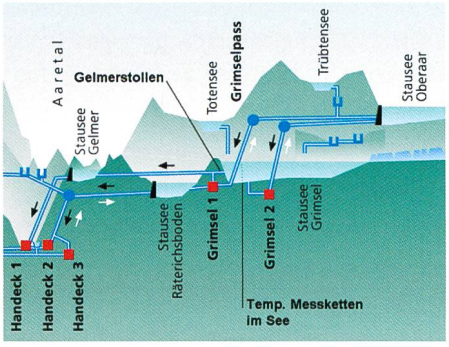


Bild 1. Anlagen der KWO im Grimselgebiet (Hintergrund aus Prospekt «KWO – Grimselstrom»).

Die mögliche Beeinflussung des Schwebstoffregimes im Brienzersee durch den Kraftwerkbetrieb wird auch in der Öffentlichkeit immer wieder diskutiert. Vor allem seit der Aufnahme des Umwälzbetriebs im Grimselsee wird in Fischereikreisen vermutet, dass der Brienzersee trüber geworden sei. Um diesen Fragen nachzugehen, führten wir ab Februar 2000 eine Untersuchung des Sedimenttransports im Grimselgebiet durch. Inzwischen wurde durch den Kanton Bern auch eine viel umfassendere Studie zur Erfassung der Veränderungen der Ökologie des Brienzersees in die Wege geleitet (GBL, 2003).

2. Ablauf der Untersuchungen im Grimselgebiet

Anfang 2000 wurde der Grimselsee zur Durchführung von Sanierungsarbeiten ganz entleert. Während dieser Zeit untersuchten wir im Werk Grimsel 1 Trübe und Feinsedimentgehalt des Abflusses aus dem Oberaarsee. Ausserdem nahmen Mitarbeiter des Instituts für Geotechnik (IGT) an der ETHZ Röntgenspektren des Trockenrückstandes von Wasserproben aus diesem See und dem Gletscherbach Unteraar auf (Blaser und Bühler, 2001). Es traten vor allem Quarz und Feldspäte (etwa zu gleichen Anteilen vorhanden), Kalzit sowie die Tonmineralien Illit und Chlorit in Erscheinung, mit wenig Wechsellagerungsmineralien (Illit/Smektit). Der grösste Teil des Kalzits dürfte erst bei der Verdunstung der Wasserproben entstanden sein. Zur Erfassung der Struktur der Sedimentpartikel wurden zudem am Institut für Festkörperphysik der ETH Zürich Trockenrückstände von Wasserproben mittels eines Rasterelektronenmikroskops aufgenommen. Sie zeigten durchwegs eine splitterartige Kornform. Weitere Angaben zur Beschaffenheit der Sedimente sind in Bühler und Siegenthaler (2003) zu finden.

Aufgrund von damaligen Berichten über einen erneuten massiven Einbruch der Fischfänge im Brienzersee dehnten wir unsere Untersuchung auf den Grimselsee aus. Vorerst entnahmen wir nach der Wiederauf-

nahme des Umwälzbetriebs im Mai 2000 auch im Werk Grimsel 2 periodisch Wasserproben und massen die Trübung des durchlaufenden Wassers. Leider gingen die Messungen vom 19. Juni bis 5. Juli verloren. In diesem Werk wurde der Trübesensor naturgemäss im Rhythmus des Umwälzbetriebs abwechselnd von Grimsel- und Oberaarseewasser umströmt. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurde die gesamte Messeinrichtung Ende August 2000 in den Gelmerstollen, d.h. an den Abfluss des Grimselsees, verlegt (Bild 1). Die entsprechende Fassung befindet sich auf der rechten Talseite vor der Bogenmauer auf Kote 1833 m ü.M., d.h. 76 m unter dem Stauziel des Sees und etwa 10 m über Grund. Zur Entnahme von Probewasser wurde einige Meter hinter der Fassung im Stollen eine Verzweigung eingerichtet. Die Nähe zum See hat den Vorteil, dass das beprobte Wasser in etwa dem Wasser im See auf der gleichen Kote entspricht. Bei grösseren Abflüssen kann das Wasser allerdings wegen der Schichtung des Sees (selektive Entnahme) aus etwas höheren Niveaus stammen (Bühler und Siegenthaler, 2003). Zur Trübemessung wurde ein mariner Sensor (Sea Tech, Corvallis, Oregon) eingesetzt, der auf dem Rückstreuungsprinzip basiert und mit Licht von 880 nm arbeitet. Die entsprechenden Messwerte wurden in Intervallen von 1220 s abgefragt und gespeichert. Zusätzlich wurde auch die Wassertemperatur mit einem Temperaturlogger Minilog12 (Vemco, Nova Scotia, Kanada) gemessen. Er hat eine Auflösung von 0,015 °C und speicherte die Messwerte in Intervallen von 600 s ab. Diese Messstelle im Gelmerstollen blieb auch im Winter 2000/01 in Betrieb und wurde Anfang August 2001 abgebaut.

Die dem Seeabfluss entnommenen Wasserproben analysierten wir jeweils im Tonmineralogie-Labor des IGT in Bezug auf elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Trockenrückstand sowie auf die Korngrössenverteilung der darin suspendierten Schwebstoffe. Zur Korngrössenanalyse diente ein Streulicht-Messgerät vom Typ Microtrac FRA, XRA 410 (Leeds & Northrup), das für einen Korngrössenbereich von 0,12 bis 710 µm ausgelegt ist.

Um weitere Informationen über die Dynamik des Grimselsees zu erhalten, erfassten wir ab 8. Mai 2000 die Wassertemperatur in verschiedenen Tiefen im Rhythmus von 600 s. Dazu wurden vor der Spitellammsperre Temperaturmessketten verankert (Bild 1). Ab 5. Juli 2000 waren zwei Ketten mit Minilog12-Sensoren im Einsatz bis sich Ende November 2000 auf dem See Eis bildete.

Die Ergebnisse der erwähnten Untersuchungen sind in Bühler und Siegenthaler (2003) dargelegt. Im vorliegenden Artikel gehen wir primär auf Trübemessungen im Abfluss des Grimselsees (Gelmerstollen) und Temperaturmessungen vor der Spittellammsperre ab Sommer 2000 ein.

3. Sedimentaustrag aus dem Grimselgebiet

3.1 Trübeströme

Feinsedimente, die in den Grimselsee transportiert werden, bleiben zum Teil längere Zeit in Suspension, bevor sie abfliessen, wodurch eine längerfristige Trübung des Sees erhalten bleibt. Gemäss unseren Messungen im Grimselsee nahm der Sedimentgehalt des Abflusses jedoch zeitweise stark zu, was auf Trübeströme zurückzuführen ist. Diese Schwebstoffe gelangen schliesslich in die Aare und beeinflussen damit die Trübung im Brienzersee. Der Verlauf der Trübung ist für diesen See von grosser ökologischer Bedeutung (GBL, 2003). Unter Verwendung vorhandener Datenreihen stellte Siegenthaler (2003) deshalb die Trübung im Laufe des letzten Jahrhunderts dar und verglich sie mit den jeweiligen Seezuflüssen.

Der im Folgenden beschriebene Verlauf des Sedimentaustrags aus dem Grimselsee hat somit eine mittelbare Bedeutung auch für den Brienzersee.

Trübeströme in Stauseen entstehen, wenn das eingetragene Wasser dank seinem Schwebstoffgehalt schwerer ist als das übrige Seewasser und gemäss Bild 2 dem Talgrund entlang bis zur Staumauer fliesst, wo es schliesslich zurückgestaut wird. Solche Strömungen und bauliche Massnahmen zu ihrer Beeinflussung wurden kürzlich durch Oehy (2002) eingehend experimentell untersucht und Methoden zu deren numerischen Modellierung evaluiert (Oehy und Schleiss, 2003).

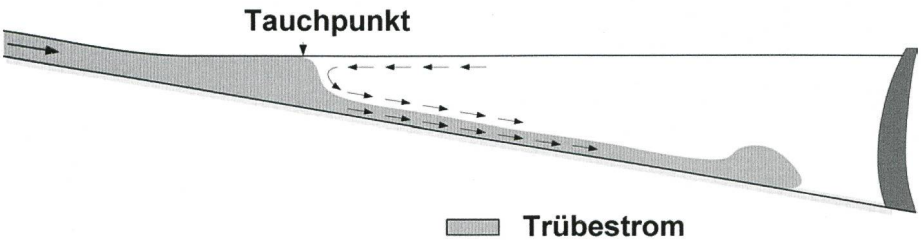


Bild 2. Entstehung eines Trübestroms, nach Oehy (2002).

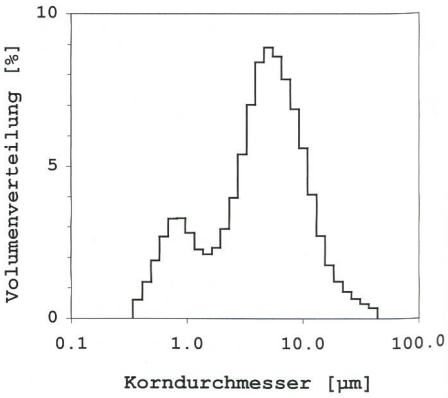


Bild 3. Korngrössenverteilung in einer Wasserprobe vom 23. Oktober 2000. Die Treppenlinie stellt die prozentualen Sedimentanteile der Probe in den einzelnen Korngrössenintervallen dar.

3.2 Analyse von Wasserproben aus dem Abfluss des Grimselsees

Zur Charakterisierung der aus dem Grimselgebiet abfliessenden Sedimente wurde in unregelmässigen Intervallen von einigen Tagen bis Wochen Tiefenwasser des Grimselsees aus dem Gelmerstollen entnommen. Anschliessend wurde die Korngrössenverteilung der suspendierten Schwebstoffe dieser Wasserproben bestimmt. Zur Abschätzung der aus dem Grimselsee abfliessenden Sedimentfracht wurde auch der Feststoffgehalt der Proben ermittelt.

Bild 3 zeigt die Korngrössenverteilung in einer Probe vom 23. Oktober 2000. Augenfällig ist die bimodale Verteilung, die möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass die Proben sowohl isometrische Partikel aus Quarz und Feldspat enthalten als auch eher plättchenförmige Tonmineralien. Bimodale Verteilungen wurden von Blaser und Bühler (2001) auch im Kraftwerk Innertkirchen 1 gefunden, andererseits waren die im Juni 2000 und 2001 im Seeabfluss gemessenen Verteilungen unimodal.

Die Korngrössen der Schwebstoffe im Abfluss des Grimsel- und Oberaarsees lagen für die bis November 2000 und im Frühling 2001 entnommenen Proben durchwegs im Bereich zwischen ca. 0,3 und 40 µm, mit einem mittleren Durchmesser d_{50} von etwa 4 µm. Auch eine Sedimentprobe, die am 30. Mai 2001 bei tiefem Wasserstand auf der alten Strasse westlich der Brücke zwischen den beiden alten Grimselseelein gesammelt wurde, liegt in diesem Bereich. Im Winter 2000/01 waren die suspendierten Sedimente wesentlich feiner, mit Korngrössen im Bereich von 0,2 bis 20 µm und d_{50}-Werten um 2 µm.

Der Feststoffgehalt wurde durch Verdunsten der Proben und Wägen ihres Trockenrückstands bestimmt, er enthält des-

halb auch die im Wasser gelösten Stoffe. Sein Verlauf ist zusammen mit der Leitfähigkeit der Proben in Bild 4 zusammengefasst. Der pH-Wert lag generell im Bereich zwischen 6 und 7.

Im Verlauf des Trockenrückstands sind hier erste Hinweise auf Trübeereignisse im Herbst 2000 und solche im Frühling 2001 erkennbar. Mögliche Auswirkungen der Ereignisse auf die Leitfähigkeit sind dagegen weit geringer.

3.3 Abschätzung der Schwebstofffracht

Bild 4 vermittelt einen Überblick über den Trockenrückstand des Wassers im Abfluss des Grimselsees während der Messkampagne. Abgesehen von zwei extremen Ereignissen lagen die Werte unter 100 mg/l, wobei die Konzentrationen unter dem Eis während des Winters abnahmen. Für eine grobe Abschätzung der aus Grimsel- und Oberaarsee abfliessenden Schwebstoffe gingen Bühler und Siegenthaler (2003) davon aus, dass der Trockenrückstand der Wasserproben im Grimsel- und Oberaarsee immer mindestens 50 mg/l betrug und dass höhere Konzentrationen nur im Grimselsee auftraten. Nach Abzug von etwa 10 mg/l an gelösten Stoffen entspricht diese minimale Konzentration einem Grundgehalt an Suspensat von 40 mg/l, der mit dem mittleren Jahresabfluss aus beiden Seen multipliziert eine Grundfracht von etwa 10 000 t/Jahr ergibt. Für das weitere Vorgehen wurde der zeitliche Verlauf der Feststoffkonzentration im Grimselsee durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Messungen rekonstruiert (Bild 4). Zeiten, in denen der Trockenrückstand 50 mg/l überschritt, wurden Trübeereignissen zugeschrieben und die zusätzliche Konzentration mit dem momentanen Abfluss aus diesem See multipliziert. Dies ergab eine mittlere zusätzliche Fracht von 41 t/Tag während der Messkampagne oder etwa 15 000 t/Jahr. Gesamthaft entlässt somit der Grimselsee jährlich etwa 25 000 t feine Schwebstoffe. Die aus den Seen abgeführte Fracht kann mit derjenigen verglichen werden, die dem Grimselsee zufliesst. Gemäss einer seismischen Studie von Bühler und Anselmetti (2002) beträgt die Sedimentationsrate im vorderen Teil des Sees bis zum Trüebtenbach etwa 50 000 m^3/Jahr. Im hinteren Teil des Sees musste die Sedimentationsrate abgeschätzt werden, da der ursprüngliche Talgrund nicht mehr erkennbar war. Der entsprechende Beitrag dürfte ca. 25 000 m^3/Jahr erreichen. Bei einer Dichte von etwa 1,5 t/m^3 entspricht dies einer Sedimentationsrate von rund 100 000 t/Jahr. Dies bedeutet, dass etwa 20% der ca. 125 000 t/Jahr eingetragenen Feststoffe den Grimselsee als feine Schwebstoffe passieren.

4. Häufigkeit und Ursachen von Trübeströmen im Grimselsee

Bild 5 zeigt den Verlauf des im Tiefenwasser des Sees gemessenen Trübesignals vom 10. Juli 2000 bis 1. August 2001 (schwarze Kurve). Bis zum Unterbruch am 24. August 2000 wurde die Trübe im Werk Grimsel 2 gemessen, anschliessend mit dem gleichen Sensor im Gelmerstollen. Am 25. Oktober 2000 ist ein Sprung des Trübesignals ersichtlich. Damals wurde die Messstelle gewartet und der Trübesensor gereinigt. Der Unterschied zwischen den Signalstärken vor und nach dem Sprung ist in etwa ein Mass für den zu erwartenden Messfehler. Da dieser im Vergleich zum Messwert nicht zu vernachlässigen ist, wurde dieses Signal nur zur qualitativen Beurteilung des Trübeverlaufs verwendet.

Trübeereignisse sind hier dank höherer zeitlicher Auflösung besser erkennbar als in Bild 4. Zum Vergleich sind auch die Wassertemperatur im Gelmerstollen und die Seekote dargestellt. Diese Kurven sind über der grünen Horizontalachse unten im Bild aufgetragen, die bei der Seekote einem Niveau von 1830 m ü.M. entspricht. Auf der schwarzen Achse oben im Bild sind Tageswerte von Niederschlag (schwarze Balken) und mittlerer Lufttemperatur (rosa Treppenlinie) im Grimselhospiz sowie Tagesmittel des Seezuflusses (dunkelblaue Treppenlinie) aufgetragen. Der Seezufluss wird durch die KWO mittels einer Bilanz aus der gemessenen Seespiegelschwankung und den bekannten Zu- und Abflüssen infolge des Kraftwerkbetriebs ermittelt. Diese Berechnungsart kann bei eisbedecktem See zu scheinbar negativen Zuflüssen führen, wenn sich bei sinkendem Wasserspiegel grosse Eismassen auf dem Seeboden absetzen und dann im See das entsprechende Wasservolumen nicht mehr verdrängen.

Gemäss Bild 5 traten Trübeereignisse (schwarze Kurve) bei starken Zuflüssen (dunkelblaue Treppenlinie oben) am 25. Juli, 22. August, 21. September sowie am Wochenende vom 14./15. Oktober auf, an dem sich auch die verheerende Rutschung im Dorf Gondo ereignete. Die starke Seetrübung an diesem Wochenende bestätigt eine Annahme von Oehy und Schleiss (2003), die aufgrund des damaligen starken Niederschlags davon ausgingen, dass sich ein sedimentreicher Trübestrom gebildet hätte.

Vom 13. bis 16. Oktober 2000 fiel starker Regen und etwas Schnee. Die Seezuflüsse erreichten bis 60 m^3/s im Tagesdurchschnitt. Ab Freitag, 13. Oktober, wurde über das ganze Wochenende kontinuierlich gepumpt (positive grüne Treppenlinie unten). Am 14. Oktober fiel die Temperatur im Gelmerstollen (rosa Kurve) rasch um $^3/_4$°C ab, und das Trübesignal stieg innerhalb von sechs Stunden auf den vierfachen Wert an. Da zu dieser Zeit auch kein Wasser via Gelmerstollen abgelassen wurde (rote Flächen am unteren Bildrand), verblieben die Schwebstoffe anfänglich im See und wurden von dort zum Teil in den Oberaarsee gepumpt. Nach etwa drei Wochen ging die Trübung auf einen stabileren Wert zurück.

Der Anstieg des Trübesignals ist bei solchen Ereignissen sehr rasch. Das Maximum wird meist innerhalb eines Tages erreicht, anschliessend fällt das Signal über längere Zeit wieder ab. Nicht jeder Regen führte jedoch zu einem Anstieg der Trübung, was z.B. aus dem Verlauf des Niederschlags und des Zuflusses am 1. Oktober 2000 hervorgeht (schwarze Säulen bzw. dunkelblaue Treppenlinie oben). Falls ein Trübestrom auch an diesem Datum entstand, war er offensichtlich nicht mächtig genug, um an der Bogenmauer bis auf die Höhe des Ablaufs in den Gelmer-

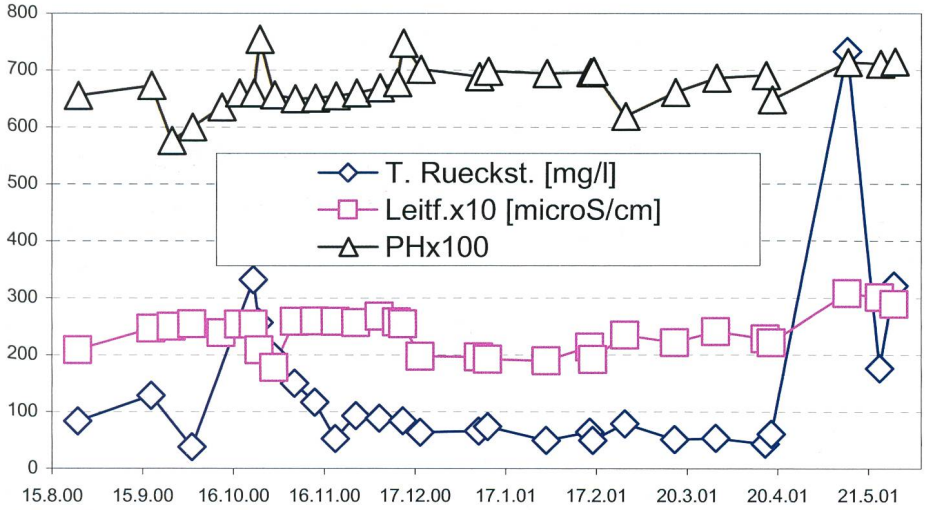


Bild 4. Trockenrückstand und Leitfähigkeit der entnommenen Wasserproben.

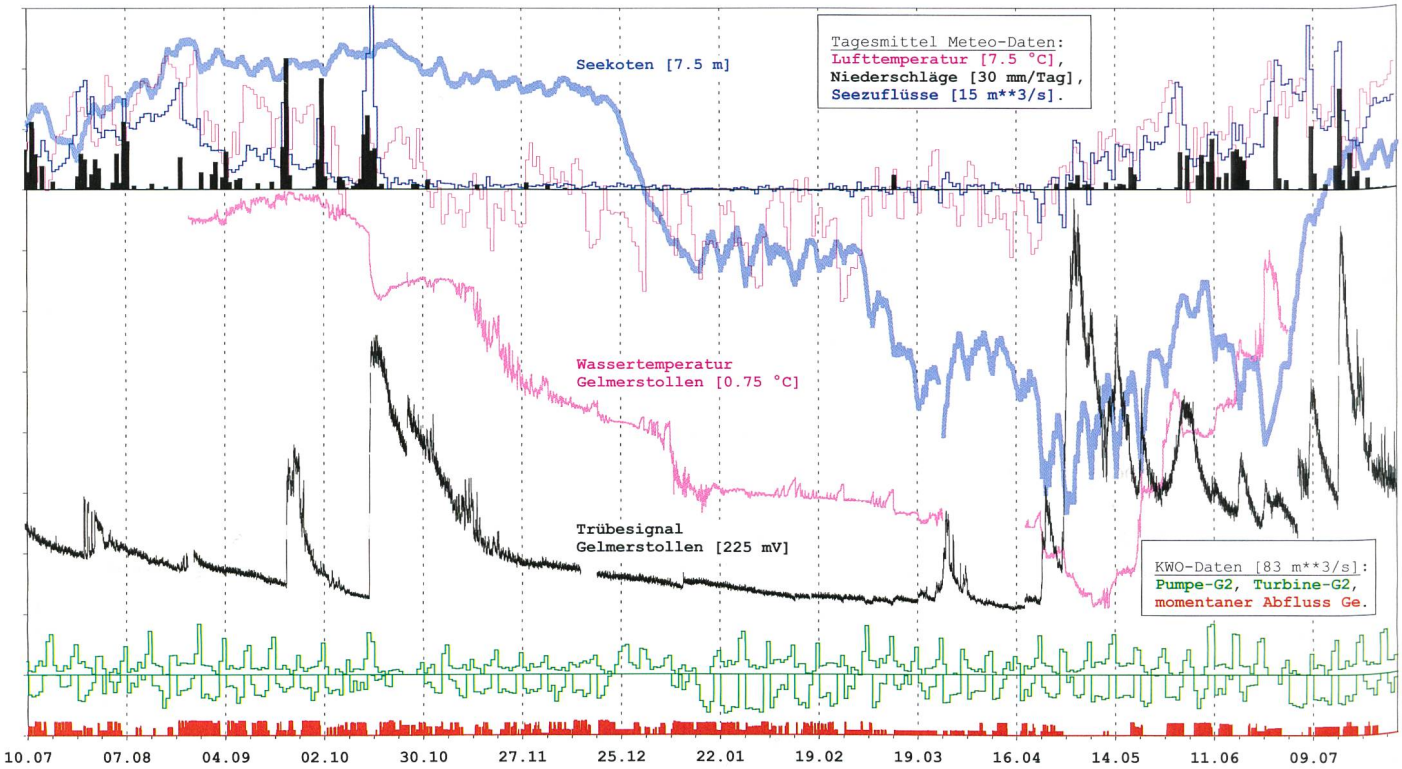


Bild 5. Gelmerstollen-, KWO- und Meteodaten sowie Seekoten von Montag, 10.7.2000, bis Mittwoch, 1.8.2001; die Skaleneinheit, d.h. der Abstand zwischen benachbarten Skalenstrichen, ist jeweils in eckiger Klammer angegeben. Die Meteodaten sind auf der schwarzen Horizontalachse oben im Bild aufgezeichnet. Auf der grünen Achse unten im Bild sind ausser den mittleren Tagesabflüssen durch Pumpen (positiv) und Turbinen (negativ) im Werk Grimsel 2 (G2) auch das Trübesignal und die Wassertemperatur im Seeabfluss durch den Gelmerstollen sowie die Seekote aufgetragen, wobei diese auf der Achse 1830 m ü.M. beträgt (Offset). Die Abflüsse aus dem See (in den Gelmersee und das Werk Grimsel 1) sind auf der roten Achse auf dem unteren Bildrand aufgetragen.

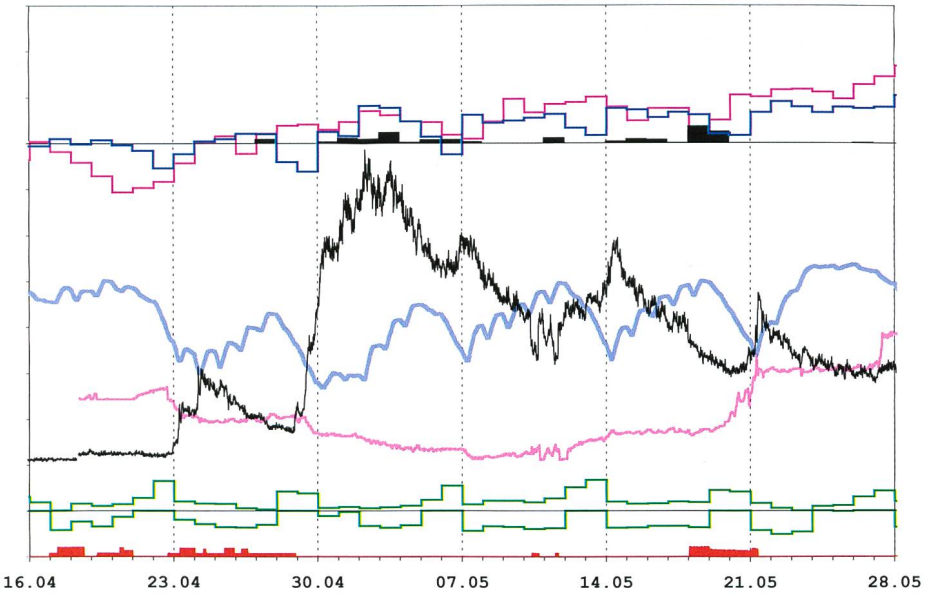


Bild 6. Ausschnitt aus Bild 5. Das Absetzen von Eismassen im Grimselsee auf Grund, erkennbar an reduzierten oder «negativen» Seezuflüssen (dunkelblaue Treppenlinie oben) bei sinkendem Seespiegel (blau), löste nach dem Wochenende vom 21./22. April 2001 und an den vier folgenden Wochenenden jeweils einen Anstieg der Trübung im Tiefenwasser aus (schwarz).

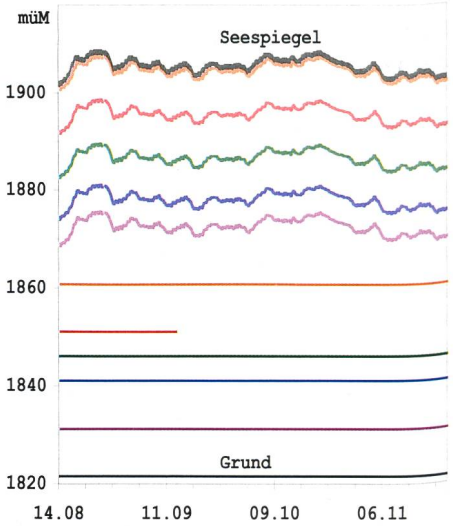


Bild 7. Koten des Seespiegels und der Temperatursensoren vor der Bogenmauer im Herbst 2000. Zum Vergleich liegt der Abfluss des Sees durch den Gelmerstollen auf 1833 m ü.M., die Fassung des Werks Grimsel 2 im Bereich des Chessiturms auf 1842 m ü.M.

stollen (10 m über Grund) zurückgestaut zu werden.

Während des Winters klarte der See etwas auf, bis ab Ende März wieder Trübeereignisse erkennbar sind. Diese können jedoch im Gegensatz zu denjenigen vom Herbst 2000 nicht auf grosse Zuflüsse zurückgeführt werden, sondern traten bei niedrigen und nach rasch sinkenden Wasserständen (dicke blaue Kurve) an Wochenenden auf. Die bilanzmässig errechneten Seezuflüsse (oben, dunkelblau) nahmen gleichzeitig ab und wurden z.T. negativ, da sich offenbar Eisschollen auf dem Seegrund absetzten. Ein erster Absetzvorgang am 18. März 2001 bewirkte nur eine geringfügige Zunahme der Trübe. An den Wochenenden vom 24./25. März und vom 21./22. April bis zum 19./20. Mai sind grössere Absetzvorgänge mit darauf folgenden Trübeereignissen zu erkennen. Sie traten alle bei Seeständen

unter etwa 1860 m ü.M. auf. Bild 6 zeigt den Verlauf der Messgrössen im Gelmerstollen nach dem Wochenende vom 21./22. April 2001. An diesem und den folgenden Wochenenden wurde viel gepumpt (positive grüne Treppenlinie unten). Da der Wasserstand sehr niedrig und der See entsprechend klein war, führten diese Wasserentnahmen zu einer raschen Absenkung des Wasserspiegels bis nahe an die Betriebskote von 1850 m ü.M. Der Seezufluss in dieser Zeit ist infolge der Absetzung von Eis stark reduziert oder erscheint als negativer Wert.

Drei mögliche Ursachen der Trübeereignisse im Frühling sind nahe liegend: Durch das Absetzen des Eises wurde der Abfluss des Gletscherbachs behindert, und er unterspülte darauf die Eismassen (a), wegen der Eisbelastung rutschten noch wassergesättigte Bereiche des Deltas ab (b) oder durch das rasche Absenken der Koten wurden Sedimentablagerungen an den steilen Seitenhängen destabilisiert (c). Alle drei Vorgänge können stark befrachtete Trübeströme zur Folge haben. Im ersten Fall jedoch nur, wenn der Gletscherbach in nennenswertem Mass Wasser zuführt.

Der Anstieg der Trübung war bei diesen durch die Wasserstandabsenkung bedingten Ereignissen im Frühjahr langsamer als bei den Hochwasserereignissen im Herbst. Ab Anfang Juli stieg das Seeniveau infolge der Schneeschmelze an, und die Trübeereignisse fielen gemäss Bild 5 wiederum mit starken Niederschlägen und grossen Zuflüssen zusammen.

5. Einfluss von Trübeströmen auf die saisonale Temperaturschichtung

Bild 7 zeigt die Koten des Seespiegels und der Temperatursonden der beiden Messketten vom 14. August bis 22. November 2000. Beide Ketten hingen an je einer Boje. Die obere trug ein Gewicht, entsprechend folgten die Sensorpositionen der Oberfläche. Das untere Ende der zweiten Kette war dagegen an der Staumauer fixiert. Da die Wasserseite der Mauer etwas geneigt ist, standen so beide Ketten frei im See. Die Temperaturmessungen im Herbst 2000 sind von besonderem Interesse, weil gleichzeitig die Trübung im Gelmerstollen, d.h. direkt am See, gemessen wurde.

In der warmen Jahreszeit sind Seen geschichtet. In diesem Fall bewirkt ein Trübestrom, der durch einen erhöhten Zufluss in Gang gesetzt wird, einen Temperaturanstieg im Tiefenwasser. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass der Trübestrom warmes Oberflächenwasser einmischt (Wüest et al., 1988) bevor er dem Hang entlang in die Tiefe abfliesst und dort kälteres, aber klareres Wasser nach oben verdrängt. In den Daten einer früheren Temperaturmesskampagne der KWO aus dem Jahr 1989 sind solche plötzlichen Temperaturanstiege auch im Grimselsee klar erkennbar (Bühler und Siegenthaler, 2001). Gemäss den von Bühler und Siegenthaler (2003) dargestellten Seetemperaturen zeigte sich ein entsprechender Temperaturanstieg am 5. Juni 2000. Die Temperatur am Grund nahm damals bei grossen Seezuflüssen innerhalb einiger Stunden um 0,2 °C zu. Dagegen hatte ein noch grösserer Seezufluss am 12. Juni einen Temperatursprung von nur 0,025 °C zur Folge. Beim in Bild 5 erkennbaren Trübestrom vom 25. Juli wurde eine Temperaturzunahme von 0,6 °C am Grund gemessen.

Bild 8a zeigt die ab Mitte August 2000 gemessenen gleitenden Tagesmittel der Seetemperaturen. Rasche Temperaturzunahmen am Grund (schwarze Linie) sind bei den Trübeströmen vom 22. August und 21. September 2000 erkennbar. Im Gegensatz zu den Ereignissen im Sommer war beim Trübeereignis vom 21. September 2000 die Temperaturschichtung im Grimselsee fast verschwunden. Anschliessend erwärmte sich die oberste Schicht nochmals, bis der See gegen Mitte Oktober erneut praktisch homotherm wurde. Das Trübeereignis von Mitte Oktober nimmt eine Sonderstellung ein, weil es im Gegensatz zu den vorhergehenden von einer raschen Abnahme der Temperatur im Tiefenwasser begleitet war.

In Bild 8b sind solche kurzfristige Änderungen der Temperaturverteilung im

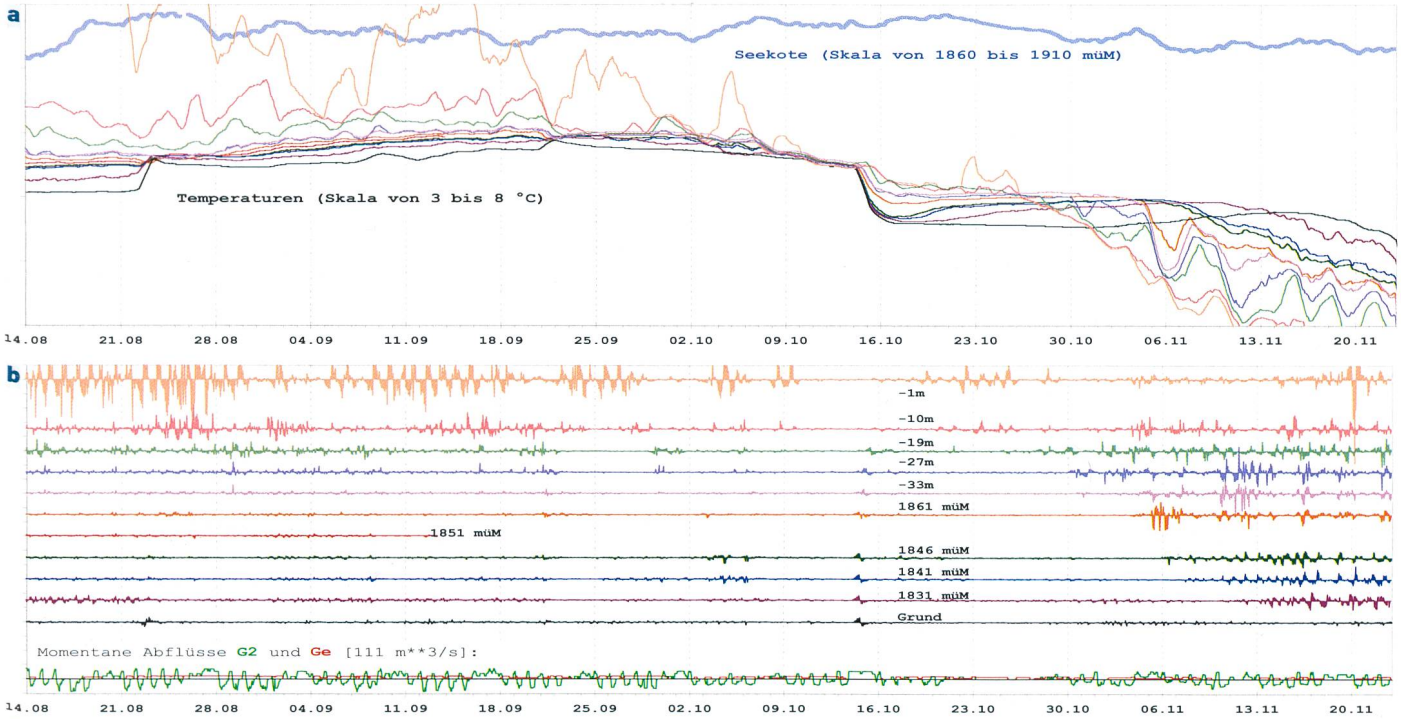


Bild 8. Temperaturdaten im Grimselsee vor der Spittellammsperre und momentane KWO-Abflüsse von Montag, 14. August, bis Mittwoch, 22. November 2000.
Bild 8a (oben). Seeniveau und gleitendes 24-h-Mittel der Temperatur, Sondenpositionen siehe Bild 8b.
Bild 8b (unten). Abweichungen der Temperatur vom gleitenden 24-h-Mittel, Massstab: [0,5 °C] pro Skaleneinheit (= Abstand zwischen benachbarten Skalenstrichen). Auf Horizontalachse unten im Bild: Abflüsse in Pumpen (positiv) und Turbinen (negativ) des Werks Grimsel 2 (G2) sowie aus dem See (Ge); [111 m**3/s] pro Skaleneinheit.

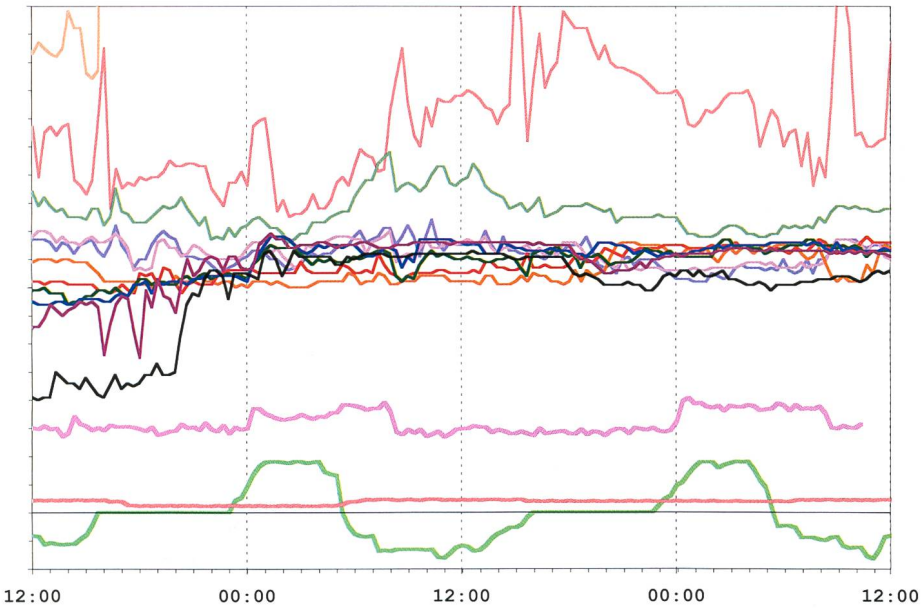


Bild 9. Temperaturverlauf vor der Spittellammsperre ab Dienstag, 24. August 2000, mittags (Skala von 4,5 bis 6,5 °C). Sondenpositionen siehe Legende Bild 10. Auf der Horizontalachse unten sind Trübesignal (mit Offset) und Abflüsse im Grimsel 2 sowie Abflüsse aus dem See aufgetragen (Skalen siehe Bild 10).

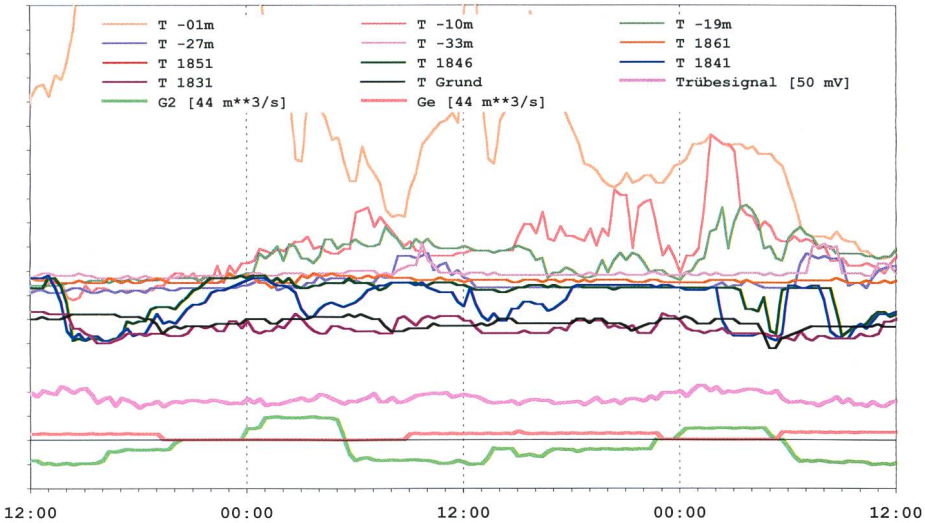


Bild 10. Temperaturverlauf über die Seetiefe vor der Spittellammsperre ab Mittwoch, 4. Oktober 2000, mittags (Skala von 5 bis 7 °C) sowie Trübesignal (mit Offset) und Abflüsse im Gelmerstollen (Ge) und Abflüsse im Grimsel 2 (G2). Die Skaleneinheit, d.h. der Abstand zwischen benachbarten Skalenstrichen, ist in eckiger Klammer angegeben.

See hervorgehoben. Hier sind die Abweichungen der gemessenen Temperaturen von ihrem gleitenden Tagesmittel dargestellt. Konkret wurde z.B. von der Temperatur um 13 Uhr an einer bestimmten Sonde der Mittelwert der an ihr von 01:00 am Morgen des gleichen Tags bis 01:00 am Morgen des nächsten Tags gemessenen Temperaturen abgezogen. Die so gebildete Abweichung ist repräsentativ für kurzfristige Temperaturschwankungen, wie sie etwa durch die tags und nachts unterschiedliche Sonneneinstrahlung, aber auch durch den Umwälzbetrieb von Montag bis Freitag und durch Trübeströme hervorgerufen werden können. Solche Störungen der Temperaturverteilung im See unterscheiden sich durch den Ort ihrer Entstehung und die Richtung ihrer Ausbreitung. Täglich durch Wind und Sonneneinstrahlung erzeugte Störungen entstehen an der Seeoberfläche und breiten sich anschliessend in tiefere Schichten aus, wobei sie sich abschwächen. In der Figur 8b entspricht diese Ausbreitung einer Bewegung der Störungen nach unten und in der Zeit nach rechts. Demgegenüber dürften durch Umwälzbetrieb und Trübeströme generierte Störungen im Tiefenwasser bzw. am Grund entstehen und sich in ähnlicher Art nach oben auswirken.

Bild 8b zeigt, dass am 22. August 2000 voneinander unabhängige Störungen sowohl von der Oberfläche als vom Grund ausgingen. Der detaillierte Verlauf der Temperaturen und Trübung während dieses Ereignisses ist in Bild 9 dargestellt. Die Temperatur über dem Grund nahm nachmittags plötzlich um 0,3 °C zu (schwarze Linie), gegen die Oberfläche hin ist die Zunahme bis auf Kote 1861 m ü.M. erkennbar (orange). Auf der Basislinie sind zum Vergleich die Abflüsse aus dem Grimselsee (orange) und im Werk Grimsel 2 (grün) dargestellt. Das Trübesignal (dicke violette Kurve) wurde damals noch im Grimsel 2 aufgenommen. Der Beginn der Trübung erfolgte so einige Zeit nach dem Beginn der beiden Pumpvorgänge, d.h. das Pumpwasser des Werks Grimsel 2 enthielt erwartungsgemäss Wasser aus dem Trübestrom.

Bis Mitte Oktober wurde das Geschehen im Oberflächenwasser des Sees vor allem durch das Wetter und im Tiefenwasser durch Trübeströme dominiert. Um den 4. Oktober 2000 sind jedoch auch eigenartige Störungen im Tiefenbereich der Fassungen zu erkennen, die weder von der Seeoberfläche ausgehen noch durch einen Trübestrom bedingt sind. Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang mit dem Kraftwerkbetrieb besteht, wurde der Verlauf der Seetemperaturen in dieser Zeit mit den Abflüssen via Gelmerstollen und den Durchflüssen im Werk Grimsel 2 verglichen (Bild 10). Die grössten Störungen sind auf den Koten 1841 und 1846 m ü.M zu erkennen (dunkelblaue bzw. dunkelgrüne Kurve), ein Zusammenhang mit dem Kraftwerksbetrieb ist jedoch nicht ersichtlich.

Während des Trübestroms vom 14. Oktober 2000 wurde die Temperaturverteilung infolge eines Zuflusses von etwa 10 Mio. m^3 (ca. 10% des Seevolumens) kalten Wassers über die gesamte Seetiefe signifikant verändert. Vorher war der See wegen des vorausgegangenen Kälteeinbruchs fast homotherm, bei einer Temperatur von etwa 5,5 °C (Bild 11). Durch die starken Niederschläge vom 13. bis 16. Oktober wurde ein schwebstoffreicher Trübestrom in Gang gesetzt, der am Samstag, den 14. Oktober, das Grimselseebecken vor der Spittellammsperre erreichte. Im Gegensatz zu den früheren Ereignissen verdrängte der kalte Trübestrom hier darüber liegendes wärmeres Wasser. Anschliessend wurde er innerhalb von etwa zwei Stunden an der Bogenmauer bis über die Sonde in 27 m Tiefe aufgestaut (hellblau). In einer Schaukelbewegung sank die Oberfläche des Trübestroms nach weiteren drei Stunden wieder unter die Kote 1861 m ü.M. ab, und es strömte warmes Oberflächenwasser nach. Auch diese Bewegung kam sechs Stunden später zum Stillstand, und es bildete sich bei etwa 27 m Wassertiefe eine scharfe Grenzfläche zwischen dem abgekühlten Tiefenwasser und dem relativ unbeteiligten Oberflächenwasser aus,

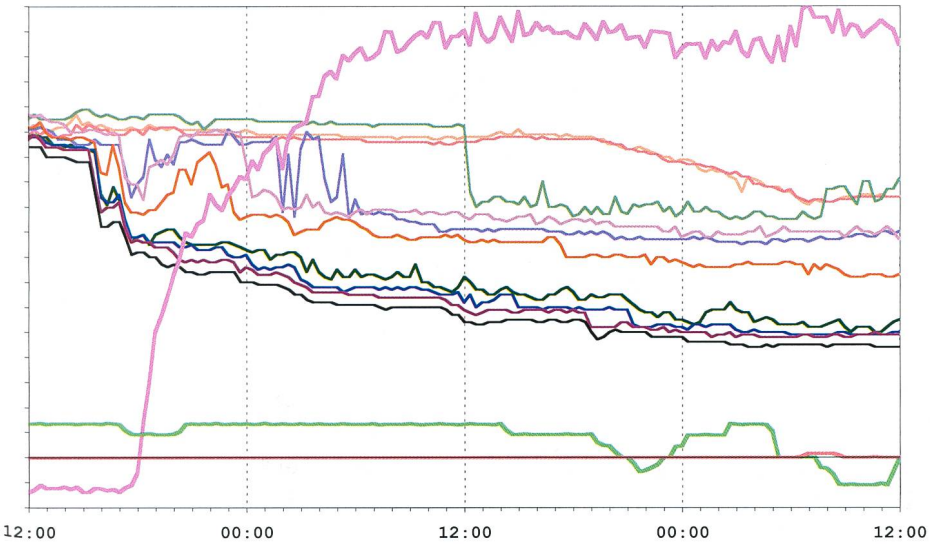


Bild 11. Temperaturverlauf vor der Spittellammsperre ab Samstag, 14. Oktober 2000, mittags (Skala von 4 bis 6 °C), Horizontalachse unten: Trübesignal (mit Offset) sowie Abflüsse aus dem See und in Grimsel 2. Sondenpositionen und Skalen siehe Legende Bild 10.

sodass der dortige Sensor auch bei kleinen auf der Grenzfläche laufenden Wellen beträchtlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt war. Diese Grenzfläche stieg dann weiter an und erreichte Sonntagmittag schliesslich die Sonde in 19 m Wassertiefe (hellgrün). Schliesslich wurden auch die beiden obersten Sonden von der Störung betroffen, und ihre Temperatur begann abzusinken.

Um den 26. Oktober 2000 begann gemäss Bild 8a die herbstliche Temperaturinversion des Sees, bei welcher – infolge der Dichteanomalie des Wassers um 4 °C – das wärmere Wasser gegen das Ende der Messkampagne in die Tiefe absank und das kältere obenauf schwamm. Dabei entstanden im Oberflächenwasser des Sees offenbar ausgeprägte interne Wellen mit einer Periode von etwa fünf Tagen.

6. Schlussfolgerungen

Die Resultate unserer Untersuchungen am Grimselsee in den Jahren 2000 und 2001 zeigen, dass das Geschehen im Oberflächenwasser dieses Sees vorwiegend von der Meteorologie dominiert wird. Massgebend ist vor allem die tägliche Variation von Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung. Der Einfluss dieser Grössen auf die Wassertemperatur nimmt mit der Tiefe ab. Die interne Dynamik im Tiefenwasser, insbesondere von der Höhe der Fassungen bis zum Grund, wurde dagegen durch Ereignisse dominiert, die auf Trübeströme zurückzuführen sind. Grössere Trübeströme, die bis zu den Fassungen aufgestaut werden, wurden auf zwei unterschiedliche Arten erzeugt. Im Sommer und Herbst 2000 waren sie durch sedimentreiche Hochwässer der Seezuflüsse als Folge von Starkregen und Wärmeperioden bedingt. Im Frühling 2001 dagegen wurden sie durch Variationen des Wasserstandes infolge des Umwälzbetriebs ausgelöst. In dieser Jahreszeit war der See eisbedeckt und klein, sodass er sich bei Pumpbetrieb an Wochenenden stark und rasch absenkte. Die dabei abgeführten Schwebstofffrachten sind mit denen vom vorhergehenden Sommer und Herbst vergleichbar. Inwieweit diese periodische Auslösung von Trübeereignissen im Frühling sich von den Verhältnissen vor Aufnahme des Umwälzwerks im Jahr 1980 unterscheidet, ist mangels entsprechender Vergleichsdaten nicht feststellbar. Siegenthaler (2003) verglich jedoch Messungen der Sichttiefe im Brienzersee von 1945 bis 1949 mit solchen seit 1993, und ein Vergleich für die Monate April bis Juni zeigt keine Abnahme der Sichttiefe in der zweiten Messperiode.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Direktion der KWO, die uns die Durchführung dieser Studie in ihren Anlagen ermöglichte, bei ihren Mitarbeitern im Betriebsgebäude und im oberen Aaretal, die mit ihrem persönlichen Einsatz über längere Zeit zum guten Gelingen des Unterfangens beitrugen, sowie bei Dr. G. Kahr vom IGT für die Beratung und die logistische Unterstützung bei der Analyse von Wasserproben. Michael Schurter möchten wir für die Unterstützung bei den Feldmessungen und die Verankerung der Messketten danken. Die Aufarbeitung und Interpretation der Messdaten wurden durch das Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern finanziell unterstützt.

Literaturhinweise

Blaser, S., und Bühler, J. (2001): Werden durchlaufende Partikel in hydraulischen Maschinen fragmentiert? WEL, 93. Jhg., Heft 11/12, 305–311.

Bühler, J., und Siegenthaler, Ch. (2001): Diurnal temperature variations in a pumped storage reservoir. 6th Int. Workshop on «Physical Processes in Natural Waters», Univ. of Gerona, 189–193.

Bühler, J., und Siegenthaler, Ch. (2003): Veränderungen im Ökosystem Brienzersee, Teilprojekt 3.2: Korngrössenverteilung, Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen im Grimselgebiet. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor, 59 S. Siehe auch www.gsa.bve.be.ch/gbl/de/seen/brienzersee/pdf/berichte/bzsee_bericht_b%FChler_phase_1.pdf

Bühler, R., und Anselmetti, F. (2002): Ablagerungen in den Grimsel-Stauseen. Teil A: Grimselsee. Limnologielabor des Geologischen Institutes der ETH Zürich, 32 S.

GBL (2003): Veränderungen im Ökosystem Brienzersee, Phase II: «Prioritätensetzung» Expertenbericht, Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor, 20 S. Siehe auch: www.gsa.bve.be.ch/gbl/de/seen/brienzersee/pdf/berichte/bzsee_synthese_expertenbericht_phase_2.pdf

Oehy, Ch., (2002): Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Faculté ENAC, EPFL (Diss. ETH Lausanne Nr. 2684, oder Communication N° 15 du Laboratoire de constructions hydrauliques).

Oehy, Ch. und Schleiss, A. (2003): Beherrschung von Trübeströmen in Stauseen mit Hindernissen, Gitter, Wasserstrahl- und Luftblasenschleier. WEL, 95. Jhg., Heft 5/6, 143–152.

Siegenthaler, Ch. (2003): Veränderungen im Ökosystem Brienzersee, Teilprojekt 3.1, Brienzersee: Analyse vorhandener Datenreihen. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor, 49 S. Siehe auch: www.gsa.bve.be.ch/gbl/de/seen/brienzersee/pdf/berichte/bzsee_bericht_siegenthaler_phase_1.pdf

Wüest, A., Imboden, D. M., and Schurter, M. (1988): Origin and Size of Hypolimnic Mixing in Urnersee, the Southern Basin of Vierwaldstättersee (Lake Lucerne). Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie – Swiss Journal of Hydrology, Bd. 50, Nr. 1, S. 41–70.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Johannes Bühler*, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETHZ, CH-8093 Zürich, E-Mail: buhler@ihw.baug.ethz.ch

Dr. *Christoph Siegenthaler*, Beratender Geologe, Zwinglistrasse 40, CH-8004 Zürich.

Dr. *Rustem Simitovic,* Seminarstrasse 56, CH-8057 Zürich.

Dr. *Alfred Wüest,* Angewandte Gewässerökologie (APEC), FZL-EAWAG, Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum, E-Mail: alfred.wuest@eawag.ch

Dr. *Markus Zeh,* Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor, Schermenweg 11, CH-3014 Bern, E-Mail: markus.zeh@bve.be.ch

ADAMS

Armaturen für Wasserkraftwerke
Armatures pour hydrocentrales
Armature per centrali idroelettriche

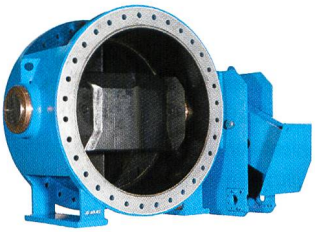
Rohrbruchsicherung
Sicurezza rottura tubo
Sécurité rupture de tuyau

Kugelschieber für Turbinenanschluss
Saracinesca a sfera per allacciamento turbina
Armature sphérique pour raccordement turbine

Kegelstrahlschieber
Saracinesca getto cono
Coulisse cône-jet

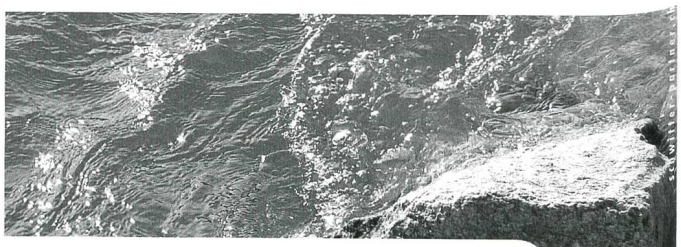
Ausbaurohr
Tubo di rivestimento
Tuyau de démontage

Be- und Entlüftungsventil
Valvola di ventilazione, valvola di sfiato
Clapet d'aération, clapet de désaération



Turbinensicherung
Sicurezza turbina
Sécurité turbine

ADAMS SCHWEIZ AG, Verwaltung und Werk, Badstrasse 11, CH-7249 Serneus, Telefon +41 (0)81 410 22 22, Fax +41 (0)81 410 22 29
www.adamsarmaturen.ch info@adamsarmaturen.ch



wir sind mit dabei...

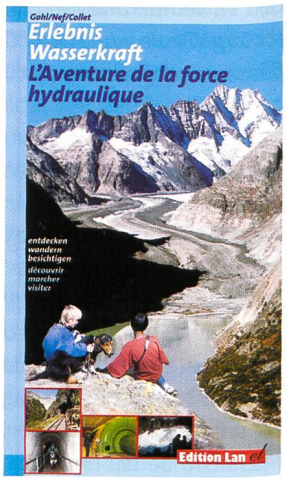
Strom auf sicher
www.aew.ch

AEW ENERGIE AG

Mitglied der aspo

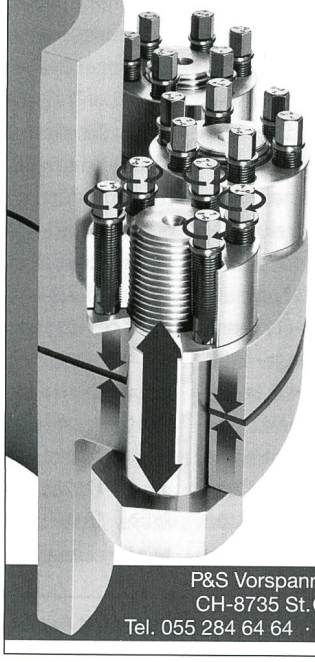
Werden Sie Mitglied beim Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband...
Abonnieren Sie unsere Fachzeitschrift «Wasser, Energie, Luft»...
Bestellen Sie unsere Verbandsschriften...
Näheres finden Sie unter:
www.swv.ch

Devenez membre de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux...
Abonnez notre revue technique «Eau, énergie, air»...
Commandez nos publications...
Pour plus de détails:
www.swv.ch



SUPERBOLT®

Spannelemente mit Vielfachschrauben: stark und clever



Wir danken dem Kraftwerk Bremgarten für den Auftrag zur Verschraubung der Wellen-Kupplung.

P&S Vorspannsysteme AG
CH-8735 St. Gallenkappel
Tel. 055 284 64 64 · www.p-s.ch

P&S®