

Messung von Sedimentflüssen in periglazialen Stauseen mit Wasserproben, LISST und ADCP

Daniel Ehrbar, Lukas Schmocker, David Vetsch, Robert Boes und Michael Döring

Zusammenfassung

Der Rückzug der Gletscher aufgrund des Klimawandels eröffnet der Wasserkraft neue Perspektiven. Im periglazialen Umfeld ergeben sich jedoch neue Herausforderungen an die Konstruktion, den Betrieb und den Unterhalt von Wasserkraftanlagen. Insbesondere das Abflussregime sowie der Sedimenttransport werden sich in den nächsten Dekaden stark verändern und sind schwer abzuschätzen. Da durch den Gletscherrückzug leicht erodierbarer Untergrund freigelegt wird, ist mit einer Zunahme der Stauraumverlandung im alpinen Raum zu rechnen. Verschiedene Stauseen sind bereits heute hohen Verlandungsraten ausgesetzt, bei anderen wird eine Beschleunigung der Verlandung festgestellt.

Die Stauraumverlandung wird durch die Sedimentflüsse im Stausee bestimmt. Diese Transportprozesse werden zurzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts im Griessee studiert, einem der höchstgelegenen Stauseen der Schweiz mit einem zu 48% vergletscherten Einzugsgebiet. Eine Kombination von Wasserproben, *Laser in-situ Scattering Transmissometry* (LISST) und *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) wird verwendet, um die Sedimentflüsse mit hoher räumlicher Auflösung zu untersuchen.

Die Messkampagne im Sommer 2015 hat gezeigt, dass sowohl Korngrößenverteilung als auch Schwebstoffkonzentration im Stausee relativ konstant sind. Ein Grossteil der Schwebstoffe gehört zur Silt-Fraktion. Die Mediane der Durchmesser (d_{50}) wurden zu ca. 5 und 10 μm bestimmt. Die mittleren Schwebstoffkonzentrationen liegen bei ca. 80 mg/l. Mit ADCP-Messungen konnte zudem ein Trübestrom erfasst werden.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Messkampagne vom 18. August 2015 diskutiert. 15 Wasserproben, ein LISST-Profil und zwei ADCP-Transsekte werden analysiert. LISST- und ADCP-Messungen werden mit den Wasserproben verglichen. Die neuartigen Möglichkeiten, aber auch die Anwendungsgrenzen von LISST und ADCP werden gezeigt.

1 Einleitung

In den nächsten Jahrzehnten werden die Zuflüsse in periglaziale Stauseen erst zu- und später abnehmen. Der Übergang zwischen diesen beiden Phasen ist vom Vergletscherungsgrad, dem gesamten Eisvolumen und der Verteilung des Eisvolumens in verschiedene Höhenlagen des Einzugsgebiets abhängig (Farinotti *et al.* 2012). Die sich zurückziehenden Gletscher legen unbewachsene, leicht erodierbare Vorfelder frei. Die mobilisierten Sedimente können in stromabwärts liegende Stauseen transportiert und darin deponiert werden (Geilhausen *et al.* 2013). 70 bis 100% dieser Sedimente sind typischerweise Schwebstoffe (Jenzer Althaus 2011), welche im gesamten See abgelagert werden können. Das Schwebstoff-Aufkommen ist im Wesentlichen durch deren Verfügbarkeit gesteuert, d.h. die hydraulischen Bedingungen für den Transport sind von untergeordneter Bedeutung (Stott & Mount 2007). Deshalb wird der Sedimenteintrag in Stauseen zukünftig voraussichtlich zunehmen, wenn im Einzugsgebiet der Anteil an nicht vergletscherten Flächen zunimmt.

Stauräumverlandung ist ein wichtiger Aspekt von Stauseen im periglazialen Umfeld. Die Stauräumverlandung Gebidem unterhalb des Grossen Aletschgletschers würde beispielsweise ohne Gegenmassnahmen innerhalb von 20 bis 30 Jahren komplett verlanden (Meile *et al.* 2014). Weltweit nimmt die Netto-Speicherkapazität derzeit ab, weil die Stauräumverlandung schneller voranschreitet als neuer Speicherplatz geschaffen wird (Auel & Boes 2012). Die Stauräumverlandung führt jährlich zu Ersatzinvestitionen von 13 bis 19 Billionen (10^{12}) US-\$ (Schleiss *et al.* 2010).

Die Sedimentflüsse im Stausee bestimmen dessen Verlandungsprozesse. Massgebende Parameter sind, unter anderen, die Korngrössenverteilung, die Schwebstoffkonzentration und die Fliessgeschwindigkeiten. Neue Messtechnik-Entwicklungen wie die Laser in-situ Scattering Transmissometry (LISST) oder Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) bieten neue Möglichkeiten, diese Parameter zu untersuchen. Bis anhin wurden nur wenige Messungen mit diesen Geräten in Gletscherseen durchgeführt (u.a. Kotschuk *et al.* (2005) und Menczel & Kotschuk (2013) oder Hodder & Gilbert (2007) und Hodder (2009)). Ein Grund dafür mag die Tatsache sein, dass diese Messtechniken bei jeder Messung sorgfältig kalibriert und validiert werden müssen. Dazu können z.B. Wasserproben verwendet werden, die wiederum aufwendig entnommen und im Labor analysiert werden müssen.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden Sedimentflüsse in drei verschiedenen Schweizer Stauseen untersucht. Erstmals wurde dazu eine systematische Kombination von Wasserproben, LISST und ADCP angewendet. Dadurch wurde ein detaillierter Einblick in die Sedimentflüsse in periglazialen Stauseen möglich. In diesem Beitrag werden LISST- und ADCP-Messungen im Griessee präsentiert und diskutiert. Die Daten wurden in zwei Messkampagnen im Sommer und Herbst 2015 erhoben. Die erste fand bei Teilstau auf gut der Hälfte des nutzbaren Bereichs statt, die zweite bei Vollstau. Die LISST- und ADCP-Daten werden mit Wasserproben verglichen und die Anwendungsgrenzen der Messverfahren aufgezeigt.

Die Messdaten werden anschliessend für die Kalibrierung und Validierung eines numerischen Modells verwendet. Dieses soll in der Lage sein, die Stauräumverlandung über einen langen Zeitraum (mehrere Jahrzehnte) abzubilden. Für Prognose-Rechnungen sollen verschiedene Klimaszenarien als Randbedingung angewendet werden.

2 Methoden

2.1 Messkampagne

Die Feldmessungen wurden am Griessee durchgeführt. Er ist einer der höchstgelegenen Stauseen der Schweiz: der Vollstau liegt bei 2'386.5 m ü.M., der minimale Betriebswasserspiegel bei 2'350 m ü.M. Die maximale Wassertiefe erreicht 66 m. Die Seefläche beträgt 0.6 km², das Seevolumen 18 hm³.

Der Griessee liegt unterhalb des Griessgletschers (Abb. 1). 48% des rund 10 km² grossen Einzugsgebiets sind derzeit vergletschert. Bourban & Papilloud (2015) beschreiben den erwarteten Gletscherrückzug: Der Gletscher verliert jährlich rund 20-25 m an Länge und 2-3 m an Mächtigkeit. Bis 2070 wird der Gletscher vollständig abgeschmolzen sein (Farinotti *et al.* 2012). Der Griessee ist stark vom Gletscherrückzug und dem dadurch verstärkten Sedimentaufkommen betroffen.

Aufgrund von Baumassnahmen musste der Griessee im Sommer 2015 abgesenkt werden (Abb. 1). Dies ermöglichte eine Beprobung des Seegrunds und die Kartierung der Sedimentablagerungen. Zwei Messkampagnen, eine bei etwa mittlerem Füllstand, eine bei Vollstau, wurden im Sommer und Herbst 2015 durchgeführt. In diesem Beitrag werden nur Daten der ersten Messkampagne vom 18. August 2015 diskutiert. An diesem Tag war der Seestand auf 2'373.3 m ü.M. Es war regnerisch, der Zufluss vom Gletscher resp. dessen Vorfeld betrug rund 1.5 m³/s. Die Wassertemperatur betrug rund 7°C.



Abb. 1 Griessee am 2. Juli 2015, Blick von Nordost nach Südwest Richtung Griesgletscher

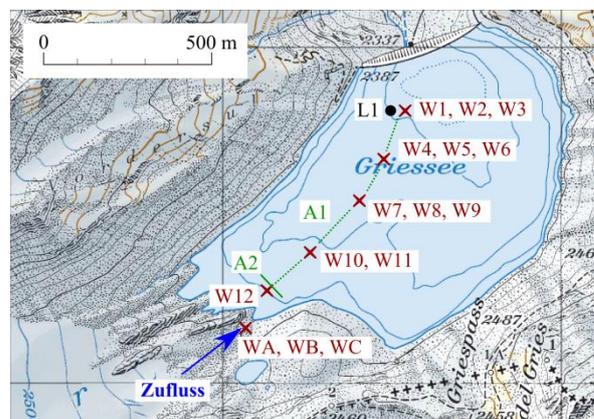


Abb. 2 Messorte ¹

- x Wasserproben WA-C und W1-W12
- LISST-Messung L1
- ... ADCP-Transsekt A1
- ADCP-Transsekt A2

2.2 Messtechnik

2.2.1 Wasserproben

Die Lage der verschiedenen Messpunkte und -profile im See sowie der Wasserprobenentnahme ist in Abb. 2 dargestellt. 15 Wasserproben wurden entnommen und hinsichtlich Korngrößenverteilung und Schwebstoffkonzentration untersucht. Drei Proben wurden dem Zufluss entnommen („WA-WC“), zwölf aus dem Stausee („W1-W12“). Die Probenahme erfolgte mit einer 2 l-Niskin-Flasche. Die Entnahmestellen liegen im LISST-Profil resp. den ADCP-Transsekten. Aus operativen Gründen konnten die Proben nur in Tiefen zwischen 1 und 20 m entnommen werden.

Die Korngrößenverteilung der Wasserproben wurde im Labor mit einem Horiba Partica LA-950 Laser-Diffraktometer bestimmt. Die Schwebstoffkonzentration wurde mit einem Wiegeverfahren mit einer Mettler Toledo XPE205 Präzisionswaage ermittelt. Das Analyse-Verfahren ist in Ehrbar *et al.* (2016) detailliert beschrieben.

2.2.2 LISST

Laser in-situ Scattering Transmissometry (LISST) ist ein Produktname von Sequoia Scientific, Inc. Damit wird ein eintauchbares Laser-Diffraktometer bezeichnet, welches gleichzeitig die Korngrößenverteilung und Schwebstoffkonzentration im Wasser misst. Im Rahmen der Messkampagne wurde ein LISST-100X Typ C eingesetzt. Dieses Gerät kann bis in 300 m Tiefe ein-

¹ Karte reproduziert mit Bewilligung der swisstopo (JA100120)

gesetzt werden. Im *Post-Processing* wurde die sog. „randomly shaped particle inversion method“ angewandt. Die Anwendungsgrenzen beschränken sich auf Körner zwischen 1.9 und 381 μm und Schwebstoffkonzentrationen zwischen 1 und rund 750 mg/l. Ein 90%-Pfadreduktionsmodul (PRM) erlaubte es, auch höhere Konzentrationen zu messen. Neben Korngrößenverteilung und Schwebstoffkonzentration können mit LISST Parameter wie Transmission, Absorption, Tiefe und Temperatur gemessen werden. Die generelle Funktionsweise von LISST ist in Andrews *et al.* (2011) zusammengefasst. Die Anwendungsgrenzen und Genauigkeit werden in Felix *et al.* (2013) diskutiert. In diesem Beitrag wird ein vertikales LISST-Profil gezeigt. Die Lage des Profils ist in Abb. 2 mit „L1“ markiert. Das Gerät wurde von Hand langsam vom Boot auf den Seegrund abgesenkt. Pro Sekunde wurde eine Messung durchgeführt. Gemäss Haun *et al.* (2015) sollten LISST-Geräte für Transmissionswerte zwischen 0.3 und 0.98 eingesetzt werden.

2.2.3 ADCP

ADCP-Messungen (*Acoustic Doppler Current Profiler*) wurden mit einem *RiverSurveyor M9* von SonTek durchgeführt. Dieses Gerät verfügt über 9 *beams* mit Frequenzen von 3 und 1 MHz, abhängig von der Wassertiefe, und einem vertikalen Echolot von 0.5 MHz. Der ADCP wurde auf ein *Hydro Board* montiert und im „*real-time mode*“ betrieben. Er war an ein D-GPS gekoppelt, was eine Positionsbestimmung in Metergenauigkeit ermöglichte. Es wurden Messungen in Transsekten durchgeführt. Die Lage der Transsekte „A1“ und „A2“ ist in Abb. 2 dargestellt. Transsekt A1 liegt zwischen Zufluss und linkem Widerlager der Staumauer in Fliessrichtung, Transsekt A2 unmittelbar beim Zufluss quer zur Fliessrichtung. Messgrößen in verschiedenen Tiefen sind: (i) Fliessgeschwindigkeiten, (ii) *Signal-to-Noise ratio* (SNR) und (iii) Wassertiefe. Unter optimalen Bedingungen misst der ADCP Fliessgeschwindigkeiten ab 0.2 m bis in 40 m Tiefe. Der Seegrund kann bis in 80 m Wassertiefe detektiert werden. Im Griessee konnten Geschwindigkeits-Messungen bis ca. 30 m Tiefe vorgenommen werden. Die SNR kann verwendet werden, um Schwebstoffkonzentrationen abzuschätzen, wie z. B. Jay *et al.* (1999), Alvarez & Jones (2002) oder Moore (2011) gezeigt haben. Kostaschuk *et al.* (2005) und Xu *et al.* (2014) haben ADCP-Daten verwendet, um Trübestrome im See resp. Ozean zu untersuchen.

3 Resultate

3.1 Wasserproben

Drei Wasserproben (WA-WC) wurden im Zufluss entnommen. Die Korngrößenverteilung ist in Abb. 3 dargestellt. Der grösste Anteil der Schwebstoffe ist Silt (Schluff), Ton und Feinsand machen nur einen kleinen Anteil aus. Der Median der Partikel-Durchmesser (d_{50}) ist 12.7 μm , die mittlere Schwebstoffkonzentration beträgt 1281 mg/l.

Zwölf Wasserproben (W1-W12) wurden im Griessee in Tiefen zwischen 1 und 20 m entnommen (Abb. 2). Aufgrund der niedrigen Schwebstoffkonzentrationen konnten die Proben W1, W4 und W7-10 hinsichtlich der Korngrößenverteilung nicht ausgewertet werden, da die Messmethode einen minimalen Schwebstoffanteil von circa 80 mg/l verlangt. Die analysierten Proben zeigen ebenfalls eine klare Dominanz der Silt-Fraktion. Der Median der Durchmesser (d_{50}) beträgt 7.2 μm . Die Schwebstoffkonzentration der Proben W1-W10 ist annähernd konstant bei 81 mg/l. Die Proben W11 und W12 wurden knapp über dem Grund des Stausees nahe dem Zufluss entnommen und haben grössere Schwebstoffkonzentrationen von 151 bzw. 274 mg/l.

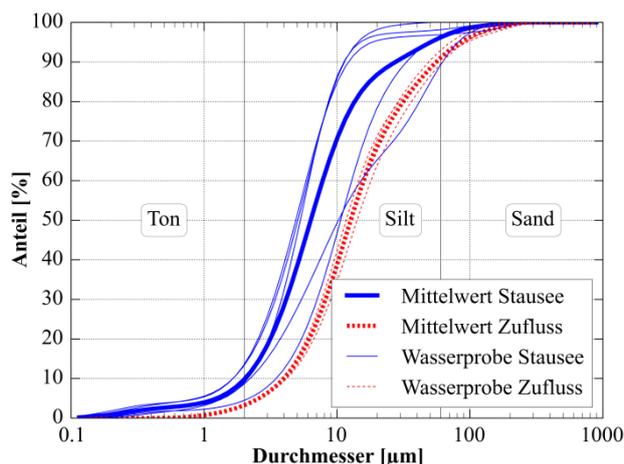


Abb. 3 Korngrößenverteilung der analysierten Wasserproben (WA-WC, W2-W3, W5-W6, W11)

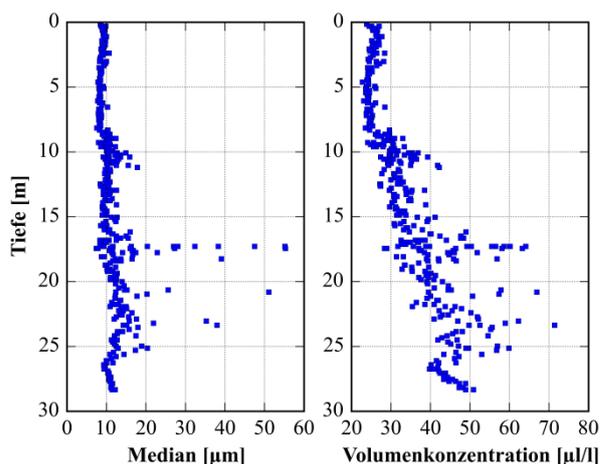


Abb. 4 LISST-Profil L1 mit Median (d_{50}) der Korndurchmesser (links) und Volumenkonzentration (rechts)

3.2 LISST

Ein LISST-Profil wurde beim linken Widerlager der Staumauer über die gesamte Wassertiefe von 28 m aufgezeichnet („L1“ in Abb. 2). Der Median der Korndurchmesser ist beinahe konstant über die gesamte Tiefe (Abb. 4). In Tiefen von rund 17, 21 und 23 m treten abrupt deutlich grössere Korndurchmesser auf. Es ist noch unklar, ob es sich dabei um tatsächliche Signale oder nur um Ausreisser handelt. Falls Werte grösser als 20 μm als Ausreisser interpretiert werden, ergibt sich ein Median von 11.3 μm .

Die LISST-Messungen weisen mit zunehmender Tiefe einen Anstieg der Volumenkonzentration von 25 auf 50 μl auf (Abb. 4). Die Umrechnung von Volumen- auf Massenkonzentration erfolgt über die Dichte der Schwebstoffe. Mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 ergeben sich Schwebstoff-Massenkonzentrationen von 66 bis 132 mg/l .

3.3 ADCP

Die mittleren Fliessgeschwindigkeiten in Transsekt A1 betragen 47 mm/s . Die mittleren vertikalen Fliessgeschwindigkeiten waren annähernd null. In Transsekt A2 nahe dem Zufluss waren die mittleren Fliessgeschwindigkeiten mit 206 mm/s deutlich höher.

Die *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) ist ein Nebenprodukt von ADCP-Messungen. Im vorliegenden Fall ist die Bezeichnung nicht eindeutig, da der ADCP von SonTek nicht den Quotienten (engl. „ratio“) von Signal und Rauschen ausgibt, sondern die Differenz von Signal minus Rauschen. Abb. 5. zeigt die SNR-Werte von Transsekt A1. Allgemein gilt, dass die SNR-Werte nahe der Wasseroberfläche mit bis zu 50 dB relativ hoch sind, mit zunehmender Tiefe aber abnehmen. Beim Zufluss nehmen die SNR-Werte in der Nähe des Seegrunds wieder zu. In Transsekt A2 (Abb. 6) sind die SNR-Werte nahe der Wasseroberfläche mit bis zu 80 dB höher als in Transsekt A1. Da das Grundrauschen des verwendeten ADCP nicht eindeutig definiert ist, sind alle Messwerte dargestellt. Im Allgemeinen wird bei ADCP-Messungen das Grundrauschen bei 3 dB angesetzt (SonTek 2000).

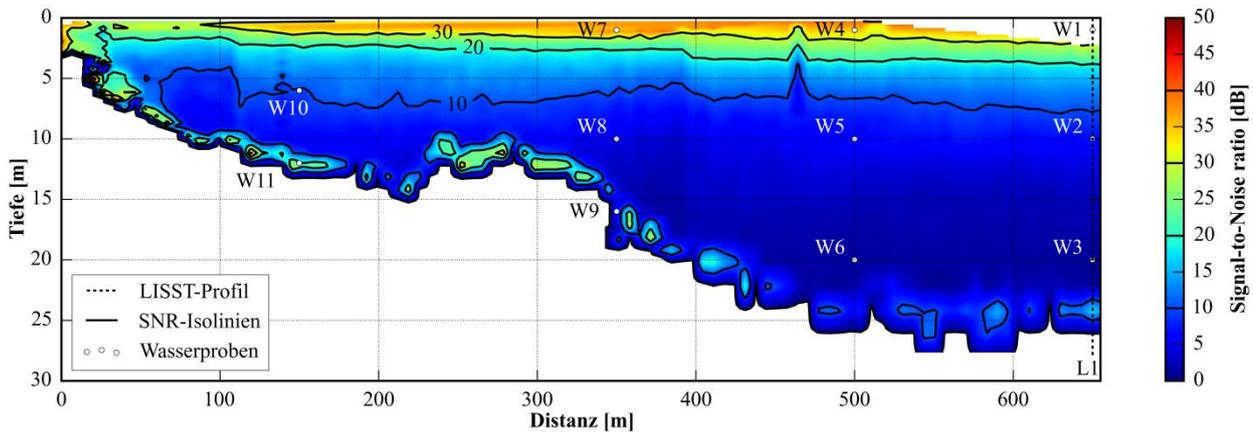


Abb. 5 SNR-Werte der ADCP-Messungen in Transsekt A1 mit Lage der Wasserproben W1-W11 und des LISST-Profiles L1

4 Diskussion

4.1 Wasserproben

Die Analyse der Wasserproben hat gezeigt, dass mehr als 80% der in den Stausee eingetragenen Schwebstoffe Silt sind. Ton ist von untergeordneter Bedeutung, Sand wird vermutlich eher als Geschiebe transportiert.

Im Stausee konnte keine ausgeprägte Veränderung der Korngrößenverteilung ausgemacht werden. Die Körner sind nur marginal feiner als im Zufluss. Der Median der Durchmesser liegt im Bereich weniger Mikrometer; die Messwerte liegen zwischen 4.9 und 10.6 μm , mit einem Gesamtmedian von 7.2 μm . Die grössten Körner haben Durchmesser im Bereich von 100 μm . Die (laminare) Sinkgeschwindigkeit solcher (kugelförmiger) Körner kann mit folgender Gleichung nach Stokes (1) (z.B. in Douglas *et al.* 1995) berechnet werden:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\lambda} \cdot g \cdot r^2, \quad (1)$$

mit v = Sinkgeschwindigkeit eines Partikels [m/s], ρ_p = Dichte des Partikels [2650 kg/m³], ρ_f = Dichte des Fluids [1000 kg/m³], λ = dynamische Viskosität des Fluids [0.0014 kg/(s·m)], g = Erdbeschleunigung [9.81 m/s²] und r = Radius des Partikels [$50 \cdot 10^{-6}$ m]. Ein Schwebstoffkorn mit einem Radius von 50 μm hat eine theoretische Sinkgeschwindigkeit von 6.4 mm/s. Solche Körner treten auch nahe dem Damm oberflächennah als Schwebstoffe auf. Sie bleiben in Schwebe, weil die Turbulenz dem gravitationsbedingten Absinken entgegenwirkt. Die mittlere vertikale Geschwindigkeit ist null, doch aufgrund der Turbulenz können Schwankungen auftreten. Die mittleren Schwankungen der vertikalen Geschwindigkeit müssen im Bereich von wenigen mm/s liegen, damit die Körner mit 100 μm Durchmesser nicht absinken. Beobachtungen von Hutter *et al.* (2011) stimmen damit überein.

Wasserproben ermöglichen die belastbarsten Messungen. Die Entnahme und Analyse dieser Proben ist aber zeit- und arbeitsintensiv, weshalb eine zeitlich oder räumlich hochaufgelöste Messreihe damit nicht realistisch ist. Trotzdem sind diese Daten unerlässlich für die Kalibrierung und Validierung von LISST- und ADCP-Daten.

4.2 LISST

Die Korngrößenverteilung kann nicht vollständig mit dem LISST-100X erfasst werden, da Körner kleiner als 1.9 μm oder grösser als 381 μm nicht analysiert werden. Somit entfällt die Ton- und Sandfraktion bei LISST-Messungen. Trotzdem können charakteristische Durchmesser wie z.B. der Median ermittelt werden, da ein grosser Teil der Sedimente innerhalb des Anwendungsbereichs des LISST liegt. Der mit LISST ermittelte Median der Durchmesser (11.3 μm) stimmt gut mit den Werten aus den Wasserproben W2 und W3 überein (10.2 und 4.9 μm), welche in 10 und 20 m Tiefe an derselben Stelle entnommen wurden.² Eine signifikante Veränderung in der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Tiefe konnte nicht beobachtet werden. Unregelmässigkeiten in 17, 21 und 23 m Tiefe können nicht eindeutig begründet werden.

Die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen (66 bis 132 mg/l) stimmen ebenfalls gut mit den Wasserproben W1-W3 überein (der Mittelwert der Wasserproben W1-W3 beträgt 84 mg/l). Die Umrechnung von Volumen- auf Massenkonzentration mit einer Dichte von 2650 kg/m³ ergibt plausible Resultate. Wie auch beim Median der Durchmesser treten auch bei den Volumenkonzentrationen Schwankungen auf, welche wahrscheinlich durch Effekte der Turbulenz verursacht werden. Solche Beobachtungen sind auch von Haun *et al.* (2013) dokumentiert worden.

Die Transmissionswerte liegen zwischen 0.86 und 0.94. Diese Werte sind relativ hoch; optimal wären Werte im gesamten zulässigen Bereich von 0.3 bis 0.98. Die hohen Transmissionswerte sind einerseits eine Konsequenz der relativ tiefen Schwebstoffkonzentrationen, andererseits aber auch des 90%-Pfadreduktionsmoduls (PRM). Das PRM ist notwendig, um innerhalb eines Trübestroms mit hohen Schwebstoffkonzentrationen zu messen. Ausserhalb davon ist es in grossen Teilen des Stausees eher nachteilig.

Für die geplante Messkampagne 2016 wird das PRM daher entfernt. Stationäre Messungen in gleicher Tiefe sollen eine weitere Quantifizierung der turbulenten Einflüsse ermöglichen. Haun *et al.* (2015) verglichen Resultate von einer stationären und einer mobilen Messung und erhielten deutliche Unterschiede in Schwebstoffkonzentration (bis zu 9% Abweichung) und Median der Durchmesser (bis zu 19%). Die Mittelung mehrerer Messungen in derselben Tiefe sollte verlässlichere Daten ergeben.

LISST-Daten sind wertvoll, weil sich gleichzeitig Korngrößenverteilung und Schwebstoffkonzentration unabhängig voneinander erfassen lassen. Die einfache Handhabung des Geräts und die zielgerichtete Datenbearbeitung sind weitere wesentliche Vorteile. LISST-100X kann im „real-time mode“ betrieben werden, d.h. Unregelmässigkeiten im Profil können sofort erkannt werden und es können Wasserproben an dieser Stelle entnommen werden. Ein Nachteil ist der eingeschränkte Anwendungsbereich.

4.3 ADCP

Es ist nicht möglich, Korngrößenverteilungen mit einem ADCP mit nur einer Frequenz herzuleiten. Guerrero *et al.* (2011) haben gezeigt, dass dies aber bereits mit einer Kombination von zwei Frequenzen möglich ist.

Schwebstoffkonzentrationen können mit den SNR-Daten abgeschätzt werden. Dazu sind in der Literatur verschiedene Ansätze vorhanden. Die einfachsten Formulierungen verbinden SNR-

² Wasserprobe W1 in 1 m Tiefe konnte aufgrund der geringen Schwebstoffmenge nur hinsichtlich Schwebstoffkonzentration untersucht werden; eine Analyse der Korngrößenverteilung war nicht möglich

Daten direkt mit der Schwebstoffkonzentration. Sie berücksichtigen keine Übertragungsverluste, weshalb sie nur auf SNR-Daten im Nahbereich des ADCP angewendet werden sollten. Alvarez & Jones (2002) schlagen folgenden (nicht dimensionsreinen) Ansatz vor:

$$C = 10^{1.1186 + 0.0245 \cdot SNR}, \quad (2)$$

mit C = Schwebstoffkonzentration [mg/l] und SNR = *Signal-to-Noise ratio* [dB]. Die Wasserproben W1, W4 und W7 liegen im Nahbereich des ADCP. SNR-Werte betragen dort rund 35 dB (Abb. 5), was gemäss Gl. (2) zu Schwebstoffkonzentrationen von $C = 95$ mg/l führt. Dies liegt nahe beim mittels Wasserproben gemessenen Wert von durchschnittlich 80 mg/l. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen, dass die SNR-Werte bei W11 und W12 deutlich höher sind: der SNR-Wert beträgt rund 55 dB bei W12, was in $C = 292$ mg/l resultiert. Tatsächlich beträgt die Schwebstoffkonzentration in dieser Wasserprobe 274 mg/l. Bei der Messung bei W11 müssen aufgrund der grossen Distanz zum ADCP auch Übertragungsverluste berücksichtigt werden. Die Wasserprobe W11 weist eine Schwebstoffkonzentration von 151 mg/l auf, welche ebenfalls deutlich erhöht ist. Das qualitative Bild der ADCP-Messung wird dadurch bestätigt.

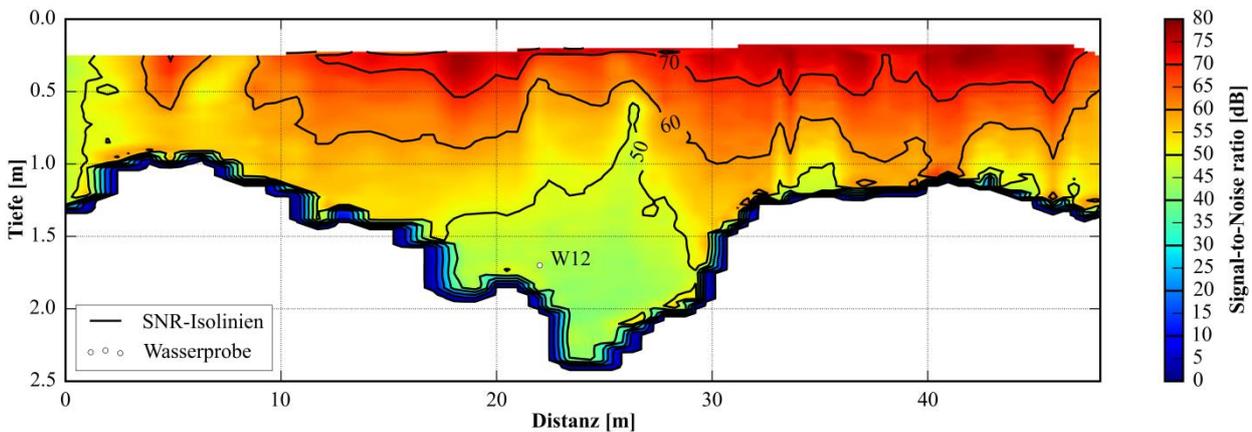


Abb. 6 SNR-Werte der ADCP-Messungen in Transsekt A2 mit Lage der Wasserprobe W12

Die SNR-Werte in grösserer Distanz zum ADCP können auch verwendet werden, doch sie müssen mit drei Arten von Übertragungsverlusten korrigiert werden: (i) Streuung, (ii) Absorption durch Wasser und (iii) Absorption durch Sediment. Urick (1975) präsentierte mit seiner SONAR-Gleichung (3) einen Ansatz, um diese drei Übertragungsverluste zu berücksichtigen:

$$SNR_{korr} = SNR + 20 \cdot \log_{10} R + 2 \cdot \alpha_w \cdot R + 2 \cdot \alpha_s \cdot R, \quad (3)$$

mit SNR_{korr} = korrigierte *Signal-to-Noise ratio* [dB], SNR = gemessene *Signal-to-Noise ratio* [dB], R = Distanz [m], α_w = Absorptionskoeffizient von Wasser [dB/m] und α_s = Absorptionskoeffizient der Schwebstoffe [dB/m]. Diese korrigierten SNR-Werte erlauben nun eine Abschätzung der Schwebstoffkonzentration in einer Distanz R vom ADCP-Gerät. Moore (2011) präsentiert Ansätze, um die beiden Absorptionskoeffizienten α_w und α_s zu ermitteln. Der Absorptionskoeffizient von Wasser ist eine Funktion der Wassertemperatur und der ADCP-Frequenz. Der Absorptionskoeffizient der Schwebstoffe ist eine Funktion der ADCP-Frequenz, der Dichten von Wasser und der Schwebstoffe, der Schallgeschwindigkeit im Wasser, dem Radius der Schwebstoffe und der Schwebstoffkonzentration. Im Allgemeinen wird α_s über eine statistische oder empirische Beziehung ermittelt, wie das z.B. Wood & Teasdale (2013) vorschlagen, und hängt sowohl von der Korngrößenverteilung als auch der Schwebstoffkonzentration ab.

Die Korrektur der SNR-Werte infolge Streuung ($20 \cdot \log_{10} R$) hat im Fall des Griessees den grössten Einfluss. Die Korrektur durch die Absorption infolge Wasser ($2 \cdot \alpha_w \cdot R$) ist eine Grössenordnung kleiner. Die Korrektur durch die Absorption infolge Schwebstoffe ($2 \cdot \alpha_s \cdot R$) ist wiederum eine Grössenordnung kleiner (Ehrbar *et al.* 2016). Die absoluten Werte sind kleiner als 1 dB und somit unter dem (angenommenen) Grundrauschen. Einerseits kann die Korrektur des SNR-Signals aufgrund der geringen Schwebstoffkonzentrationen und der kleinen Korndurchmesser dadurch vernachlässigt werden, andererseits können aber auch keine quantitativen Aussagen über Schwebstoffkonzentrationen aufgrund des SNR-Signals in grösseren Tiefen gemacht werden. Qualitative Aussagen sind möglich, wie Abb. 5 zeigt: Die Höhe und Ausbreitungsdistanz eines Trübestroms kann beispielsweise erfasst werden.

ADCP-Messungen bieten einmalige Vorteile: Sie sind nicht intrusiv, haben eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung und erlauben die zeitgleiche Messung der Fliessgeschwindigkeiten in verschiedenen Tiefen. SNR-Daten können verwendet werden, um Schwebstoffkonzentrationen abzuschätzen. Die Daten können mit vergleichsweise geringem Aufwand erfasst werden. Leider ist die Umwandlung von SNR-Daten in Schwebstoffkonzentrationen immer noch ein Problem: die Korngrössenverteilung und Schwebstoffkonzentration muss bekannt sein, um die Absorption infolge der Schwebstoffe zu quantifizieren. Iterative Technologien sind verfügbar, aber ihr Anwendungsbereich ist limitiert. Wasserproben sind die beste Möglichkeit, um ADCP-Daten zu kalibrieren. Eine simultane Entnahme von Wasserproben und ADCP-Messung ist aber praktisch kaum möglich.

5 Schlussfolgerungen

Der Rückzug der Gletscher bestimmt die Entwicklung der Gletscher-Vorfelder. Leicht erodierbare Sedimente werden freigelegt, können mobilisiert und in Stauseen stromab verfrachtet werden. Die Stauraumverlandung im periglazialen Umfeld ist somit mit dem Gletscherrückgang resp. dem Klimawandel verbunden. Diese Prozesse werden zurzeit am Griessee untersucht, einem der höchstgelegenen Stauseen der Schweiz mit einem zu 48% vergletscherten Einzugsgebiet.

Die Analyse von Wasserproben hat gezeigt, dass sowohl im Zufluss als auch im Stausee ein Grossteil der Schwebstoffe in der Silt-Fraktion liegt. Die Mediane der Durchmesser (d_{50}) liegen zwischen ca. 5 und 10 μm . Die Korngrössenverteilungen zeigen, mit Ausnahme des unmittelbaren Stauwurzelbereichs, keine ausgeprägte räumliche Variation innerhalb des Stausees. Die durchschnittliche Schwebstoffkonzentration liegt bei 80 mg/l und ist ebenfalls relativ konstant im gesamten Stauraum. Höhere Schwebstoffkonzentrationen treten nahe beim Zufluss und in einem Trübestrom nahe dem Seegrund auf. Die Schwebstoffkonzentrationen können dort bis zu 240 mg/l erreichen.

Messungen der Korngrössenverteilung und Schwebstoffkonzentrationen mit einem LISST-100X stimmen gut mit den Wasserproben überein. Obwohl nicht die gesamte Korngrössenverteilung erfasst werden konnte, können charakteristische Durchmesser wie der Median (d_{50}) berechnet werden, da ein Grossteil der Schwebstoffe innerhalb des Messbereichs liegen. In der nächsten Messkampagne werden mit LISST die natürliche Variabilität und turbulente Schwankungen von Korngrössenverteilung und Schwebstoffkonzentrationen untersucht.

ADCP-Messungen mit einem *RiverSurveyor* M9 liefern nicht nur Fliessgeschwindigkeiten, sondern auch SNR-Daten, welche für die Abschätzung der Schwebstoffkonzentrationen verwendet werden können. Die Korngrössenverteilung kann mit einem ADCP mit nur einer Frequenz je-

doch nicht erfasst werden. Ein Trübestrom konnte mit ADCP-Messungen detektiert und qualitativ dokumentiert werden. Wasserproben haben die höheren Schwebstoffkonzentrationen in diesem Strom bestätigt. Aufgrund der kleinen Korndurchmesser und der geringen Schwebstoffkonzentrationen sind die Aussagen der ADCP-Messungen im Fall des Griessees jedoch eher qualitativer Natur.

Wasserproben bilden die qualitativ hochwertigste Datengrundlage. Aufgrund der zeit- und arbeitsintensiven Datengewinnung muss deren Anzahl jedoch meistens beschränkt werden. LISST-Messungen bieten den einmaligen Vorteil einer gleichzeitigen Messung von Korngrößenverteilung und Schwebstoffkonzentration. Ihr Messbereich ist aber auf Silt und feinen Sand beschränkt. Die Schwebstoffe im Griessee sind hauptsächlich in diesem Bereich. LISST-Daten können mit geringerem Aufwand als Wasserproben erhoben werden, sind jedoch aufwändiger als ADCP-Messungen.

Die Kombination der drei Messtechniken – Wasserproben, LISST und ADCP – ist geeignet, um Sedimentflüsse in periglazialen Stauseen zu untersuchen. Messungen in zwei weiteren Stauseen und zusätzliche Messungen im Griessee werden einen vertieften Einblick in die Transportprozesse der Schwebstoffe in Stauseen mit stark vergletscherten Einzugsgebieten ermöglichen.

Dank

Das Projekt wird von Schweizer Nationalfonds (SNF) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 70 „Energiewende“ finanziert (Projekt-Nummer 153927). Es ist Teil des Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity (SCCER-SoE). Die Messkampagne wurde durch Ofima / Kraftwerk Aegina AG und die HYDRO Exploitation unterstützt.

Literatur

- Alvarez, L. G. & Jones, S. E. (2002). Factors influencing suspended sediment flux in the upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54(4): 747-759.
- Andrews, S. W., Nover, D. M., Reuter, J. E. & Schladow, S. G. (2011). Limitations of laser diffraction for measuring fine particles in oligotrophic systems: Pitfalls and potential solutions. *Water Resources Research* 47(5): 1-12.
- Auel, C. & Boes, R. M. (2012). Sustainable reservoir management using sediment bypass tunnels. *Proc. 24th ICOLD Congress*, Kyoto, Japan. International Commission on Large Dams (ICOLD).
- Bourban, G. & Papilloud, E. (2015). Gries: a global approach example for hydropower reservoir sedimentation management. *Proc. HYDRO 2015*, Bordeaux, France.
- Douglas, J. F., Gasiorek, J. M. & Swaffield, J. A. (1995). *Fluid Mechanics* (3rd Edition). Longman Group Limited.
- Ehrbar, D., Schmockler, L., Vetsch, D. F., Boes, R. M. & Döring, M. (2016). Measuring sediment fluxes in periglacial reservoirs using water samples, LISST and ADCP. *Proc. International Symposium on River Sedimentation*, Stuttgart, Germany. (eingereicht)
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. & Funk, M. (2012). Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes* 26(13): 1909-1924.

- Felix, D., Albayrak, I. & Boes, R. M. (2013). Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape. *Geo-Marine Letters* 33(6): 485-498.
- Geilhausen, M., Morche, D., Otto, J. & Schrott, L. (2013). Sediment discharge from the proglacial zone of a retreating alpine glacier. *Zeitschrift für Geomorphologie* 57(2): 29-53.
- Guerrero, M., Szupiany, R. N. & Amsler, M. (2011). Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow measurement and Instrumentation* 22(5): 392-401.
- Haun, S., Kjærås, H., Løvfall, S. & Olsen, N. R. B. (2013). Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir. *Journal of Hydrology* 479: 180-188.
- Haun, S., Rüter, N., Baranya, S. & Guerrero, M. (2015). Comparison of real time suspended sediment transport measurements in river environment by LISST measurements in stationary and moving operation mode. *Flow Measurement and Instrumentation* 41: 10-17.
- Hodder, K. R. (2009). Flocculation: a key process in the sediment flux of a large, glacier-fed lake. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(8): 1151-1163.
- Hodder, K. R. & Gilbert, R. (2007). Evidence for flocculation in glacier-fed Lillooet Lake, British Columbia. *Water Research* 41(12): 2748-2762.
- Hutter, K., Wang, Y. & Chubarenko, I. P. (2011). *Physics of Lakes. Volume 3: Methods of Understanding Lakes as Components of the Geophysical Environment*. Springer.
- Jay, D. A., Orton, P., Kay, D. J., Fain, A. & Baptista, A. M. (1999). Acoustic Determination of Sediment Concentrations, Settling Velocities, Horizontal Transports and Vertical Fluxes in Estuaries. *Proc. IEEE 6th Working Conference on Current Measurement*, San Diego, USA.
- Jenzer Althaus, J. (2011): *Sediment Evacuation from Reservoirs through Intakes by Jet Induced Flow*. Thesis 4927, Communication N°45 (A. Schleiss, ed.), LCH, EPF Lausanne
- Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J. & Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology* 68(1): 25-37.
- Meile, T., Bretz, N.-V., Imboden, B. & Boillat, J.-L. (2014). *Reservoir sedimentation management at Gebidem dam (Switzerland)*. In: Schleiss, A. J., de Cesare, G., Franca, M. J. & Pfister, M. (Eds.) *Reservoir Sedimentation*. Taylor & Francis Group London.
- Menczel, A. & Kostaschuk, R. (2013). *Interfacial Waves as Coherent Flow Structures associated with Continuous Turbidity Currents: Lillooet Lake, Canada*. In: Venditti, J. G., Best, J. L., Church, M. & Hardy, R. J. (Eds.) *Coherent Flow Structures at Earth's Surface*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Moore, S. A. (2011). *Monitoring flow and fluxes of suspended sediment in rivers using side-looking acoustic Doppler current profilers*. Doktorarbeit, Université de Grenoble.
- Schleiss, A., de Cesare, G. & Jenzer Althaus, J. (2010). Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Wasser, Energie, Luft* 102(1): 31-40.
- SonTek (2000). *SonTek/YSI Acoustic Doppler Profiler*. Technical Documentation.
- Stott, T. & Mount, N. (2007). Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: implications for global warming. *Journal of Hydrology* 332(3): 259-270.

Urick, R. J. (1975). *Principles of Underwater Sound*. McGraw Hill.

Wood, M. S. & Teasdale, G. N. (2013). *Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10*. Scientific Investigations Report.

Xu, J. P., Sequeiros, O. E. & Noble, M. A. (2014). Sediment concentrations, flow conditions, and downstream evolution of two turbidity currents, Monterey Canyon, USA. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 89: 11-34.

Anschrift der Verfasser

Daniel Ehrbar, Dr. Lukas Schmockler, Dr. David F. Vetsch, Prof. Dr. Robert M. Boes
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich
Hönggerberggring 26
CH-8093 Zürich
ehrbar@vaw.baug.ethz.ch (Daniel Ehrbar)

Dr. Michael Döring,
ZHAW Life Sciences und Facility Management
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Grüntal, Postfach
8820 Wädenswil
michael.doering@zhaw.ch