

Photogrammetrische Überwachung von Gletscherrandseen

CHRISTIAN MULSOW¹, HANS-GERD MAAS², ANJA WENDT³, GINO CASASSA³

Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs) stellen angesichts des Rückgangs von Gletschern in vielen Gebieten der Welt ein Umweltrisiko mit einem stark zunehmenden Gefahrenpotential dar. GLOFs können u. A. entstehen, wenn durch Gletscher aufgestaute Seen sich einen Weg unter dem Gletscher hindurch bahnen. Diese Seen entleeren sich dadurch in sehr kurzer Zeit und führen zu Flutwellen und Überschwemmungen in größeren Gebieten talabwärts.

In Zusammenarbeit mit chilenischen Partnern wurden Grundlagen für die Entwicklung eines GLOF-Frühwarnsystems erarbeitet. Dazu sollte der Wasserspiegel in Gletscherrandseen mit dem Ziel beobachtet werden, eine beginnende Entleerung frühzeitig zu erkennen und entsprechende Frühwarnsysteme aktivieren zu können. Aufgrund der Instabilität des Gewässerbodens und des Ufers sowie der Gefährdung durch Eisabbruch bieten sich als Pegel außerhalb des Seebeckens positionierte Sensoren an. Über photogrammetrische Verfahren kann aus monoskopischen Kameraaufnahmen der Wasserstand bestimmt werden. Grundidee bei dem hier vorgestellten Verfahren ist der Schnitt der aus dem Bild extrahierten und in den Objektraum projizierten Wasserlinie im Uferbereich mit einem bekannten Geländeprofil. Dieses muss zuvor in einem geologisch stabilen Bereich der Uferzone bei möglichst geringem Wasserstand bestimmt werden.

Der Beitrag stellt das Grundprinzip eines photogrammetrischen GLOF-Monitoringsystems und die Ergebnisse erster Messungen an zwei Gletscherrandseen im Nördlichen Patagonischen Eisfeld in Chile vor.

1 Einleitung

Gletscherrandseen sind Gewässer in unmittelbarer Nähe von Gletschern. Eine Voraussetzung für die Entstehung derartiger Wasserreservoirs ist eine Barriere (Gletschereis, Tot- oder Permafrosteis, Stirnmoräne), die das Wasser am Abfluss hindert (Raymond et al., 2003). Bei einer Destabilisierung der Barriere kann es zu einer plötzlichen Entleerung kommen. Derartige Phänomene werden als GLOFs (Glacier Lake Outburst Floods) bezeichnet. Das Aufstauen und die Entleerung ein Gletscherrandsees können auch zyklisch erfolgen, wenn sich die Barriere immer wieder neu ausbildet und ein Zufluss an Wasser vorliegt.

Da in Folge des Klimawandels in fast allen Gebieten der Welt ein Rückzug der Gletscher zu verzeichnen ist, hat sich das Gefährdungspotential durch GLOFs vergrößert (Rosenzweig et al., 2007). Zusätzliches Aufkommen an Schmelzwasser füllt bereits existierende Seen immer weiter auf und lässt zudem neue entstehen. Gleichzeitig nimmt die Stabilität der jeweiligen Barrieren ab – sei es durch die verringerte Dicke der Gletscherzunge oder das Auftauen des Geröll-Eis-Gemisches an der Moräne.

1) Dipl. Ing. Christian Mulsow, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, e-mail: christian.mulsow@tu-dresden.de

2) Prof. Dr. sc. techn. habil. Hans-Gerd Maas, e-mail: hans-gerd.maas@tu-dresden.de

3) Centro de Estudios Científicos (CECS), Valdivia, Chile

2 Ansprüche an eine Gletscherrandseeüberwachung

GLOFs resultieren oftmals in katastrophalen Überflutungen talabwärts, u.U. einhergehend mit schwerwiegenden Schäden für Mensch und Natur sowie Wirtschaft und Infrastruktur. Sie sind kein neues Phänomen, doch die Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit hat sich in Folge des Klimawandels signifikant erhöht (z.B. Rignot et al., 2003; Casassa et al., 2007).

Angesichts dieses gestiegenen Gefahrenpotentials besteht ein wachsender Bedarf an Konzepten für Frühwarnsysteme, welche anhand zuverlässiger Indikatoren GLOFs mit einer Vorlaufzeit von wenigen Stunden erkennen und melden können. Im bzw. am See installierte Pegel mit ausreichend hoher zeitlicher Auflösung ermöglichen eine frühzeitige Erkennung des Beginns einer Seeentleerung. Konventionelle Pegel kommen dabei jedoch meist nicht in Frage, da Gletscherrandseen häufig Tiefen von ca. 100 Metern aufweisen (siehe auch Abb.1) und entsprechend hohe Wasserspiegeländerungen zu überwachen sind, was einen erheblichen technischen Aufwand der Pegelkonstruktion mit sich bringt. Zudem sind Pegel ständig der Gefahr der Zerstörung durch Eisabbruch, Kollision mit Eisbergen, Sedimentation oder andere Umwelteinflüsse ausgesetzt. Ähnliche Gefährdungen bestehen häufig auch für Pegel auf der Basis von GPS-Bojen.



Abb. 1: Entleerung des Lago Chachet II im Januar 2010. Innerhalb von 2 Tagen sank der Wasserspiegel um rund 70 m.

Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung einer oder mehrerer fest (oder ggf. beweglich) außerhalb des Gefährdungsbereichs installierter solarstromgespeister terrestrischer Kameras an (siehe Abb.2). Die einfachste denkbare Arbeitsweise eines derartigen photogrammetrischen Frühwarnsystems wäre die Aufnahme und Übertragung von Bildern der Uferzone. Die Beurteilung der Bilddaten, ob nun automatisiert oder interaktiv, könnte dann räumlich losgelöst erfolgen. Als problematisch stellt sich jedoch in der Regel die Übertragung der Bilder dar. Aufgrund der meist völlig fehlenden Infrastruktur in den betroffenen Gebieten ist diese nur via Satelliten-Telefon möglich (z.B. Patagonien, siehe auch Abschnitt 3). Die begrenzte Übertragungsrates und die Kosten lassen die Übertragung kompletter Bilder jedoch nicht zu. Daher wird angestrebt, die komplette photogrammetrische Datenverarbeitungsketten (Bildanalyse, geometrische und stochastische Modellierung, Georeferenzierung, Kalibrierung) zur automatischen und zuverlässigen Ableitung von Wasserstandsdaten aus Bildsequenzen in einem System zu integrieren. Gelänge dieses, müssten nur die entsprechenden Wasserstände übertragen werden. Denkbar wäre eine weitere Reduktion der Übertragungskosten, wenn nur kritische Wasserstände übermittelt werden würden.

3 Messkampagne der TU-Dresden im Februar 2010

Das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU-Dresden kooperiert seit 2008 intensiv mit dem CECS (Centro de Estudios Científicos) in Valdivia/Chile. Das CECS hat 2009/2010 an den Gletschern *Glaciar Nef* und *Glaciar Colonia* im Nördlichen Patagonischen Eisfeld drei Kameras aufgestellt, welche in regelmäßigen Zeitabständen Bilder des *Lago Nef Norte*, des *Lago Cachet II* und eines Sees an der Front des *Glaciar Colonia* aufnehmen (siehe Abb. 2). Dabei hat das System zunächst experimentellen Charakter, Fragen der Datentelemetrie werden vorerst ausgeklammert.

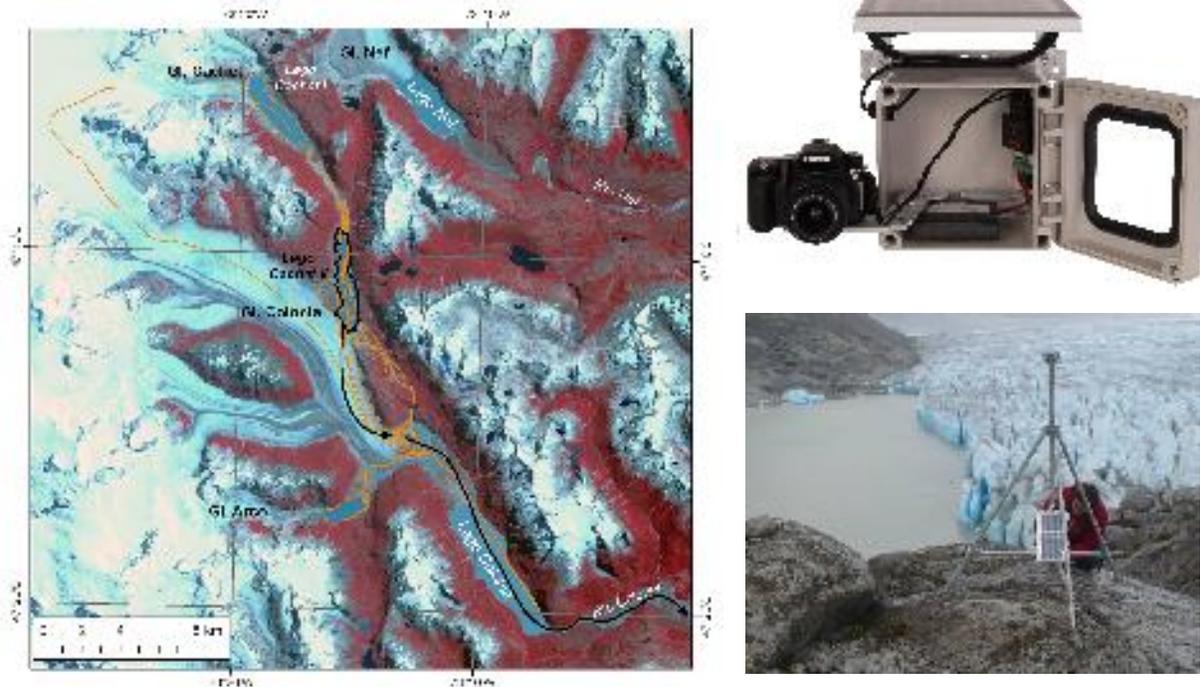


Abb. 2 Links: Lage des Lago Cachet II und Fließwege bei dessen Entleerung (Cassasa et.al., 2009). Rechts: Time Lapse Camera der Firma Harbortronics und Installation am Lago Nef Norte.

Das Gebiet eignet sich in besonderer Weise als Pilotregion für praktische Untersuchungen für ein photogrammetrisches Frühwarnsystem, da sowohl der *Lago Cachet II* wie auch der *Lago Nef Norte* in den vergangenen Jahren mehrere GLOFs, teilweise im Abstand von wenigen Monaten, produziert haben. Beide Seen sind einem unregelmäßigen GLOF-Zyklus unterworfen: Schmelzwasser staut sich auf und durch den zunehmenden hydrostatischen Druck entsteht ein Tunnel am Grund des Gletschers, durch den Wasser abfließen kann. Die Schmelz- und Erosionswirkung des Wassers erweitert den Tunnel, so dass sich der Prozess der Entleerung des Sees beschleunigt. Einige Zeit nach der vollständigen Entleerung des Sees bricht der Tunnel zusammen, ausgelöst z.B. durch die Gletscherbewegung, und das Wasser staut sich erneut auf. Mindestens drei dieser Ereignisse sind in den Bildsequenzen der installierten Kameras festgehalten (siehe Abschnitt 4). Somit konnten erste Untersuchungen zur photogrammetrischen Verarbeitung der Daten vorgenommen werden.

3.1 Datenakquisition

Bei den drei fest installierten Kameras handelt es sich um so genannte Time Lapse Kameras, welche über einen Timer in regelmäßigen Zeitabständen Bilder aufnehmen und durch ein wetterfestes Gehäuse, Solarpanel und Pufferbatterie für Langzeituntersuchungen geeignet sind. Die verwendeten integrierten Systeme stammen von *Harbortronics Inc.* (siehe Abb. 2). Darin kommen herkömmliche SLR-Kameras vom Typ *Canon EOS 1000 D* (10 Megapixel) zu Einsatz. Zur nachträglichen Kompensation etwaiger Kamerabewegungen wurden bei der Installation der Kameras noch zusätzlich Zielmarken im vorderen Sichtbereich der Kameras angebracht.

Im Rahmen einer Expedition des IPF im Februar 2010 wurden die Kameras georeferenziert. Die Übertragung der monoskopischen Messungen aus den Bildsequenzen in den Objektraum bedingte auch die Bestimmung von 3D-Informationen am Messobjekt selbst. Da die Gletscher in den relevanten Bereichen nicht begehbar sind, erfolgte die Objektkoordinatenbestimmung mit Hilfe eines photogrammetrischen Netzes. Die Lagerung des lokalen Netzes im übergeordneten Referenzsystem wurde durch die Bestimmung der Kamerastandorte durch GPS gewährleistet. Da sämtliches Equipment 9 Tage lang *per pedes* transportiert werden musste, ergaben sich Restriktionen hinsichtlich der Messausrüstung. Statt eines geodätischen GPS-Empfängers kamen daher nur ein Handheld-GPS-Gerät aus dem Outdoorbereich sowie ein Geo-Tagger zum Einsatz. Die Lage-Genauigkeiten der eingesetzten GPS-Sensoren liegen absolut bei ca. 9 m, relativ bei 4m. Die Höhengenaugigkeit ist um den Faktor 1.5 schlechter als die Lage einzuschätzen (Wanninger, 2011). Aus den Ausführungen in Abschnitt 3.3 wird deutlich, dass diese nach geodätischen Maßstäben ungenügenden Genauigkeiten für die Messaufgabe ausreichend sind.

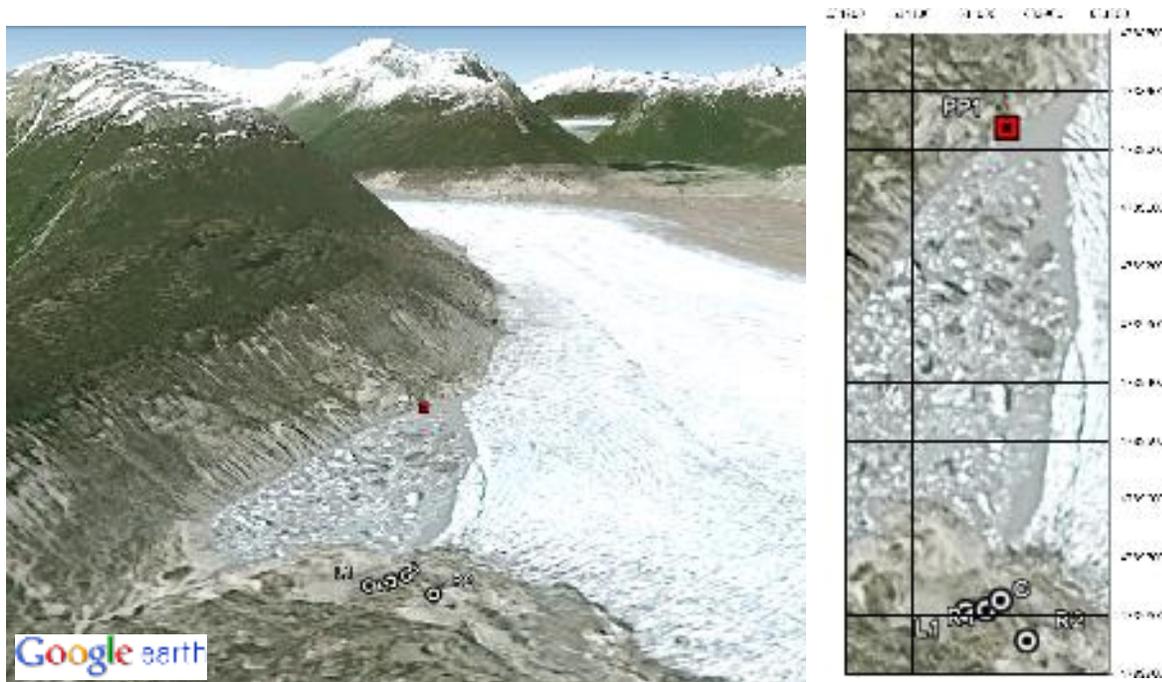


Abb. 3: Kamerastandorte und Passpunktlage am Lago Nef Norte (100m Raster über *GoogleEarth*-Aufnahmen)

Im Feld konnte die geplante Aufnahmekonfiguration nicht vollständig umgesetzt werden. Die

örtlichen Gegebenheiten ließen an allen drei Time-Lapse-Kamerastandorten keine genügend großen Basen zwischen den Referenzierungsaufnahmen zu. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die örtlichen Gegebenheiten und die Konfiguration des photogrammetrischen Netzes am *Lago Nef Norte*.

3.2 Georeferenzierung

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, erfolgte die Georeferenzierung über ein photogrammetrisches Netz. Die bereits erwähnten Schwierigkeiten bei der Datenakquisition führten an allen Gletscherrandseen zu ungünstigen Netzgeometrien (siehe beispielsweise Abb. 3). Nur am *Lago Nef Norte* konnte überhaupt ein Passpunkt durch GPS gemessen werden (siehe Abb. 3). Zu Testzwecken wurden die Aufnahmen trotzdem ausgewertet. Zunächst wurden homologe Punkte in den Bildern eines Datensatzes manuell gemessen. Besonders viele Punkte wurden an der Wasserlinie der jeweiligen Seen bestimmt, da diese als komplanar angenommen werden konnten. Im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit fixierten Kamerastandorten (aus GPS-Daten) und den Wasserlinienpunkten (als komplanar definiert) konnten die Orientierungswinkel und Neupunktkoordinaten für zwei Gletscherrandseen (*Lago Nef Norte* und *Lago Colonia*) bestimmt werden. Die Ausgleichung der Daten vom *Lago Chachet II* brachte aufgrund einer zu instabilen Netzgeometrie keine zufriedenstellenden Resultate. Die Berechnung des Netzes vom *Lago Colonia* konnte mit einem Gewichtseinheitsfehler von 4 Pixeln im Bildraum erfolgen. Die Objektpunktstandardabweichungen im relevanten Bereich des Seeufers (Abstand zur Time-Lapse-Kamera ~ 1000 m) resultierten in ~ 20 m in Tiefenrichtung und 5 m quer sowie 1.2 m in der Höhe.

Aufgrund des Vorhandenseins eines Passpunktes am südlichen Ufer des *Lago Nef Norte* (PP1, siehe Abb. 3) konnten hier weitaus bessere Ergebnisse erzielt werden. Hier resultierte die Ausgleichung in einer mittleren Genauigkeit (absolut) der Neupunktkoordinaten im Bereich des Sees (Abstand zur Time-Lapse-Kamera ~ 700 m) von 1.5 m in der Tiefe (Y-Richtung) und 0.3 m in X-Richtung. Die Höhen konnten mit einer Genauigkeit von 0.2 m bestimmt werden. Der RMSE der Bildmessungen betrug 2 Pixel.

Die (lokale) Relativgenauigkeit der Objektkoordinaten kann in beiden Fällen um eine Dimension besser eingeschätzt werden. In Anbetracht der ähnlichen Netzgeometrie beider Gebiete und die Relationen der Tiefenausdehnungen (Faktor 1.4), wird der Genauigkeitsgewinn durch einen Passpunkt im Objektraum in den Ergebnissen überdeutlich (Faktor 13 in Tiefenrichtung). Auffällig groß erscheinen in beiden Fällen die RMSE-Werte der Bildmessungen. Hier muss jedoch bedacht werden, dass keine Simultankalibrierung erfolgen konnte.

Die Bereitstellung von Objektrauminformation am *Lago Chachet II* musste aufgrund des Scheiterns der Berechnung des photogrammetrischen Netzes auf Basis von Satellitenbilddaten in *GoogleEarth* erfolgen. Hier kann mit einer Relativgenauigkeit von 20 m gerechnet werden.

3.3 Bildsequenzauswertung

Zwei Bildsequenzen standen für die monoskopische Auswertung zur Verfügung. Eine Sequenz (~ 460 Bilder) zeigt den *Lago Nef Norte* im Zeitraum 4.12.2009 - 8.2.2010. Pro Tag wurden von

6:00 bis 18:00 Uhr alle 2 Stunden insgesamt 7 Bilder aufgenommen. Die zweite Sequenz (~80 Bilder) zeigt den *Lago Chachet II* im Zeitraum 27.11.2009 - 10.2.2010. Pro Tag wurde ein Bild jeweils um die Mittagszeit aufgenommen.

Die Auswertung der Bildsequenzen erfolgte nach folgendem Schema:

- Kompensation der Kamerabewegungen: Messen der Zielmarken im Vordergrund und Resampling der Aufnahmen mit dem ersten Bild der Sequenz als Referenz. Die maximalen Verschiebungen in x- und y-Richtung beliefen sich auf 4 und 6 Pixel (*Lago Chachet II*) bzw. 42 und 32 Pixel (*Lago Nef*). Die Beträge zeigen, dass die Kamerabewegungen in einem eventuellen Frühwarnsystem nicht vernachlässigbar sind.
- Messen des Wasserspiegels in einer Profillinie: Zunächst wurde versucht, den Wasserspiegel automatisch zu messen. Dies musste aufgrund von wechselnden Beleuchtungsverhältnissen in den Bildern (Sonne vs. Wolken) und sich ändernden Ufergegebenheiten aufgegeben werden. Für ein automatisch arbeitendes System müsste diese Problematik noch zuverlässig gelöst werden; hierzu sollte u.U. eine Kamera mit einem NIR-Kanal eingesetzt werden. Schließlich wurde entlang eines senkrechten Gletscherfrontabschnitts (*Lago Chachet II*) bzw. entlang eines definierten Felsabschnittes (*Lago Nef Norte*) manuell die Wasserkante im Bild gemessen.
- Übertragung der Messwerte in den Objektraum: Umrechnung der y-Koordinatenunterschiede im Bild in Höhenwerte am Objekt auf Basis von Maßstabsinformationen und Geländeneigung aus GPS-Daten. Die Absolutgenauigkeit der ermittelten Wasserstände ist aufgrund der relativ ungenauen Orientierungsdaten aus der Georeferenzierung und den oben getroffenen Annahmen hinsichtlich der Profilgeometrie im Meterbereich anzusetzen. Für ein Frühwarnsystem sind jedoch Änderungen des Wasserstandes von Relevanz und somit die relative Genauigkeit der Wasserstandsermittlung von primärem Interesse. Diese kann im Dezimeterbereich angenommen werden.

4 Resultate

Trotz der in den Punkten 2.2 und 2.3. angeführten Problematiken konnten beide vorliegenden Sequenzen erfolgreich ausgewertet werden. Beide Sequenzen zeigen GLOF-Ereignisse. Dank der hohen temporalen Auflösung der Sequenz am *Lago Nef Norte* kann der zeitliche Ablauf eines GLOF's gut nachvollzogen werden.

Die Wasserstandsverläufe in Abb. 4 und 5 zeigen, dass der rapiden Entleerung eine Phase des langsamen Sinkens des Wasserspiegels vorangeht (siehe auch Abschnitt 3). In beiden Fällen betrug diese mindestens 24 h. Dieser Zeit kann die Fließdauer des Wassers (einige Stunden) unter dem Gletscher zuaddiert werden, womit sich die Vorwarnzeit für einen GLOF an den beiden untersuchten Gletscherrandseen noch einmal erhöht.

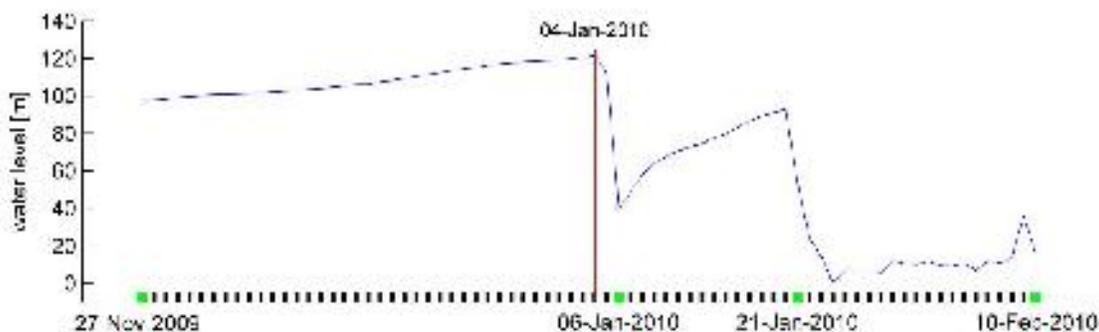


Abb. 4: Wasserstandsvariationen am Lago Chachet II. In der Grafik sind zwei GLOFs (4. und 21. Januar) innerhalb eines Zeitraums von nur 17 Tagen erkennbar.

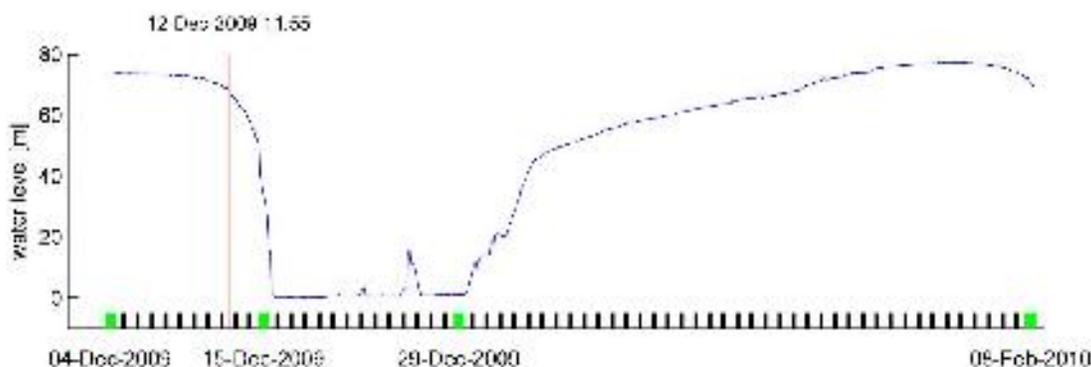


Abb. 5: Wasserstandsvariationen am Lago Nef Norte. Am Ende des Graphen ist ein sich abzeichnendes GLOF-Ereignis ablesbar. Tatsächlich entleerte sich der See bis zum 10. Februar vollständig.

5 Fazit und Ausblick

Die Eignung einer Kamera als Sensor in einem GLOF-Frühwarnsystem konnte im Rahmen der Untersuchungen grundsätzlich nachgewiesen werden. Der große Vorteil liegt in Möglichkeit der berührungslosen Überwachung von relativ großen Gletscherseebereichen. Der Kostenanteil des Sensors Kamera in einem System kann durch die Verwendung von off-the-shelf Geräten klein gehalten werden. Im Zuge der Pilotstudie wurden einige Problematiken offenbar, die bei einem operationellen System unbedingt zu beachten sind:

- Die Automatisierung der Wasserspiegelbestimmung in den Bildern ist ein fundamentales Problem, mit dem das Konzept des vorgeschlagenen kamerabasierten Frühwarnsystems steht oder fällt. Hier sind weitere Untersuchungen hinsichtlich einer verbesserten Algorithmik und Aufnahmetechnik notwendig. Bei letzterem Punkt sollte auch die Möglichkeiten der Verwendung einer Kamera, welche für nahes Infrarot sensitiv ist, ausgelotet werden.
- Notwendigkeit der Berücksichtigung der Kamerabewegungen.

- Die Übertragung der monoskopischen Messungen in den Objektraum hat großes Optimierungspotential. Bei Vorliegen eines Geländemodells von stabilen Uferbereichen (Fels) kann dieses mit den Bildmessungen des Wasserspiegels verschnitten und somit eine genauere Bestimmung der Pegellage erreicht werden.
- Die Vor-Ort Auswertung der Bilder und die Telemetrie der Ergebnisse ist noch ungelöst.

Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden in enger Kooperation des *CECS* in Valdivia, Chile und des *IPF* der *TU Dresden* durchgeführt. Sie wurden gefördert durch den *Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico* (FONDECYT) und das Internationale Büro des *BMBF*. Ein besonderer Dank gilt Jonathan Leidich und Felipe Henríquez von *Patagonia Adventure Expeditions* für die hervorragende Organisation und Unterstützung der Expedition ins Nördliche Patagonische Eisfeld.

6 Literaturverzeichnis

CASASSA, G., RIVERA, A., HAEBERLI, W., JONES, G., KASER, G., RIBSTEIN, P., SCHNEIDER, C., 2007:
Cur-rent status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, Vol. 59, pp. 1-9

CASSASA , G., WENDT,J., WENDT, A., LOPEZ,P., CARRASCO, J.,RIVERA, A., LEIDICH, J.,2009:
Monitoring of glacial lake outburst floods (GLOFS) in Chile, Planet Action Day, Toulouse
June 9 2009, presentation

RAYMOND, M., WEGMANN, M., FUNK,M.,2003: Inventar gefährlicher Gletscher in der Schweiz,
VAW Mitteilungen Nr. 182, ETH Zürich

RIGNOT, E., RIVERA, A., CASASSA, G., 2003: Contribution of the Patagonia icefields of South
America to global sea level rise. *Science*, Vol. 302, pp. 434-437

ROSENZWEIG, C., CASASSA, G., KAROLY, D., IMESON, A., LIU, C., MENZEL, A., RAWLINS, S., ROOT, T.,
SEGUIN, B., TRYJANOWSKI, P., 2007: Assessment of observed changes and responses in
natural and managed systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and
Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds. M. Parry et al.), Cambridge University
Press, pp. 79-131

WANNINGER, L., 2011: Qualitätssicherung bei GNSS-Diensten, *zfv - Zeitschrift für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement*, Nr. 123, S.8-17