

Wie steht es um die Gletscher in Zentralasien?

Ein Lagebericht auf der Grundlage satelliten- und bodengestützter Messungen

Daniel Farinotti, Andreas Güntner, Franz Barthelmes, Sergiy Vorogushyn, Doris Düthmann
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Glaciers play an important role in the water cycle of many regions of the world, especially in dry regions such as Central Asia. Glaciers can store water over decades and transfer winter precipitation into the summer months by releasing the accumulated snow and ice as melt water. The question about the state of the glaciers within a region is therefore intrinsically linked to questions about water availability and food security. We assess the current state of all glaciers of the Tien Shan (the main mountain range in Central Asia, feeding its waters to Kyrgyzstan, Kazakhstan, Uzbekistan and China) by three different groups of methods. We considered measurements of the Earth's gravity field, laser altimetry, and direct glaciological measurements, and assessed uncertainties in an ensemble-like approach. The results of all three methods agree well, increasing the confidence in the final estimate. The results indicate that during the period 2003-2009, the glaciers of the Tien Shan were losing mass at a rate of 7.1 ± 5.6 gigatons per year. Cumulated over the period, this corresponds to the water volume stored in Lake Constance (Bodensee).



Massenbilanzmessungen am Suek-Gletscher, Jetim-Bel-Gebirge, Kirgisistan (Foto: D. Farinotti, GFZ)

Mass balance measurements at Suek Glacier, Jetim-Bel Range, Kyrgyzstan

Gletscher – ein entscheidendes Element im Wasserkreislauf Zentralasiens

Gletscher spielen im Wasserkreislauf vieler Regionen der Erde eine zentrale Rolle. Sie speichern Wasserreserven über Jahrzehnte und prägen den zeitlichen Verlauf der Gebirgsabflüsse maßgeblich. So wird vor allem Schnee in der kalten Jahreszeit zurückgehalten und in Form von Schmelzwasser während der Sommermonate wieder freigegeben. Dies ist insbesondere in niederschlagsarmen Gebieten wie beispielsweise Zentralasien von großer Bedeutung, da nur dadurch ausreichend Wasser in den trockenen Sommermonaten zur Verfügung steht. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass in Kirgisistan im Jahresdurchschnitt zwar nur 15% des Abflusses aus Gletscherschmelzwasser stammt, dieser Anteil aber während der Sommermonate bis zu 45% betragen kann (z. B. Unger-Shayesteh et al., 2013). Da der Zustand der Gletscher eng mit den Fragen der Wasserverfügbarkeit und Nahrungssicherheit für die regionale Bevölkerung verknüpft ist, setzen hier die Forschungsarbeiten des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ in Zentralasien an. Neben dem Aufbau eines grenzüberschreitenden Monitoringnetzwerks wird die Massenbilanz ausgewählter Gletscher mit Hilfe moderner Monitoringmethoden kontinuierlich überwacht, um so Aussagen zur Auswirkung des globalen Wandels in dieser Region zu treffen und Handlungsoptionen gemeinsam mit den betroffenen Ländern zu entwickeln.

Die hier vorgestellten Arbeiten untersuchen den Zustand der Gletscher im Tien Shan (chinesisch „Himmlische Berge“) – dem Hauptgebirgskamm in Zentralasien, welcher sich zwischen Kirgisistan, Usbekistan, China und Kasachstan erstreckt (Abb. 1) und rund 13 000 Gletscher mit einer Gesamtgletscherfläche von etwa 15 000 km² umfasst. Die Arbeiten wurden im Rahmen des am GFZ koordinierten Projekts „Water in Central Asia“ (CAWa; www.cawa-project.net) durchgeführt und vom Auswärtigen Amt der Bundesrepublik Deutschland als Teil der „Deutschen Wasserinitiative für Zentralasien“ gefördert. Zusätzliche Unterstützung erhielt diese Studie durch den Schweizerischen Nationalfonds (SNF).

Herausforderung: kontinuierliche Messreihen

Die Beobachtung der Gletschermassen Zentralasiens hatte in der Sowjetunion einen hohen Stellenwert. So wurden während etwa drei Jahrzehnten an mehr als einem halben Dutzend Gletschern und mehrmals jährlich Messungen von Schneehöhe und Schmelze (sogenannte Massenbilanzmessungen) durchgeführt, um den Zustand der Gletscher kontinuierlich zu beobachten. Nach dem Ende der Sowjetunion im Jahr 1991 wurden

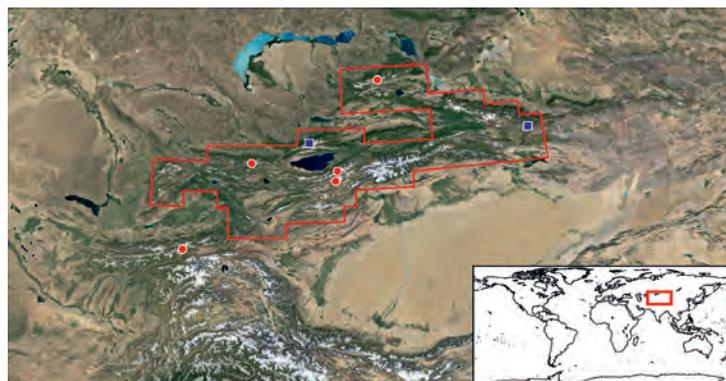


Abb. 1: Satellitenaufnahme Zentralasiens (Landsat). Der in diesem Beitrag berücksichtigte Bereich ist rot umrahmt. Gletscher mit durchgehenden Massenbilanzmessungen sind mit blauen Vierecken gekennzeichnet; rote Kreise markieren Gletscher, deren Messreihen nicht weitergeführt wurden.

Fig. 1: Satellite image of Central Asia (Landsat). The region considered in this study is contoured in red. Glacier with continuous mass balance measurements are shown with blue squares. Red circles mark glaciers for which the time series were interrupted.

jedoch die meisten Messprogramme eingestellt, lediglich zwei Messreihen wurden weitergeführt. Seit einigen Jahren werden die Messprogramme an ausgewählten Gletschern mit Beteiligung des GFZ wieder aufgenommen (Hoelzle et al., 2012), die Etablierung eines Messnetzes mit einer ausreichenden räumlichen Abdeckung ist allerdings noch nicht abgeschlossen.

Fernerkundung ergänzt bodengestützte Methoden

Methoden der Fernerkundung bieten die Möglichkeit, den aktuellen Zustand der Gletscher abzuschätzen und ergänzen die bodengestützten Messstationen. Auf Luft- und Satellitenaufnahmen lassen sich Gletscher relativ gut erkennen. Stehen solche Aufnahmen für zwei Zeitpunkte zur Verfügung, ist eine Aussage über die Flächenentwicklung der Gletscher möglich (z. B. Kriegel et al., 2013; Hagg et al., 2013). Derartige Analysen zeigen für das Untersuchungsgebiet, dass während der letzten 40 Jahre rund 20% der Gletscherfläche abgeschmolzen sind. Für die Wasserverfügbarkeit ist jedoch nicht der Flächenschwund relevant, sondern die Änderung des Volumens, also der Masse des Gletschers. In der Glaziologie spricht man von der sogenannten Gletschermassenbilanz. Traditionell werden Gletschermassenbilanzen durch Feldmessungen mit Pegeln bestimmt. Diese Methode ist aber sehr arbeitsaufwändig und nicht auf größere Gebiete (z. B. eine ganze Bergkette) anwendbar.



Kontakt: D. Farinotti
(daniel.farinotti@gfz-potsdam.de)

Auch hier bietet die Fernerkundung mit der Methode der geodätischen Massenbilanzabschätzung eine Alternative. Dabei werden zwei digitale Höhenmodelle (DHM), die für zwei unterschiedliche Zeitpunkte erstellt wurden, voneinander abgezogen. Nicht vergletscherte Regionen zeigen dabei abgesehen von Erdbeben oder Seespiegelschwankungen keine Änderungen, während bei Gletschern die Höhenänderung der Oberfläche auf Grund von Schneefall und Schmelze meist gut erkennbar ist. Über die Annahme einer Dichte für das Gletschereis kann dann die Massenänderung ermittelt werden.

Seit rund einem Jahrzehnt gibt es eine weitere Möglichkeit, um die Gesamtmassenbilanz einer vergletscherten Region abzuschätzen. Sie basiert auf der Messung des Erdschwerefelds und seiner zeitlichen Änderung. Die Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), deren Daten am GFZ prozessiert und zur Verfügung gestellt werden (GFZ Information System and Data Center; isdc.gfz-potsdam.de), erfasst z.B. die durch große Massenänderungen verursachten zeitlichen Schwankungen des Schwerefelds auf globaler Skala und eignet sich somit für eine solche Anwendung.

Umgang mit Unsicherheiten – die „Ensemble Methode“

Unabhängig davon, welche Methodik verwendet wird, ist die Schätzung der Gletschermassenbilanz eines Gesamtgebiets mit großen Unsicherheiten behaftet. Die größten Unsicherheiten stammen dabei nicht etwa aus den Messungen an sich, sondern vielmehr aus den Methoden, mit denen die Messungen über das Gesamtgebiet „übertragen“ (regionalisiert) werden. Mit der „Ensemble Methode“ können diese Unsicherheiten abgeschätzt werden. Vereinfacht formuliert lautet das Prinzip dabei: „Berücksichtige die größtmögliche Anzahl an unterschiedlichen Methoden, welche grundlegenden Plausibilitätsanforderungen genügen. Die Bandbreite, die sich aus den unterschiedlichen Resultaten ergibt, ist eine Schätzung für die Unsicherheit des Schlussergebnisses.“

Diesem Ansatz folgend wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden berücksichtigt (basierend auf den Messungen der Satelliten GRACE und ICESat sowie direkten Messungen). Die einzelnen Methoden und deren Resultate sind im Folgenden kurz beschrieben. Eine Übersicht über die wichtigsten Charakteristiken jeder Methodengruppe ist in Tabelle 1 dargestellt.

GRACE-basierte Abschätzungen

Für die GRACE-basierten Abschätzungen der Unsicherheiten wurden die neuesten Daten der Satellitenmission (Dahle et al., 2012) verwendet. Dabei wurden die Daten von drei Analysezentren berücksichtigt, nämlich des GFZ, des Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena und des Center for Space Research (CSR) in Austin. Sämtliche Rohdaten wurden anschließend mit sieben unterschiedlichen Filtern prozessiert, um den Signalanteil gegenüber Anteilen von Prozessierungs- und Messfehlern zu erhöhen. Die von GRACE gemessenen Daten (Abb. 2a) repräsentieren neben den Massenänderungen der Gletscher auch Änderungen der Wasserspeicherung in anderen Komponenten, z. B. im Grundwasser oder in Flüssen und Seen. Um den glaziologischen Signalanteil zu erhalten, müssen diese anderen Komponenten der terrestrischen Wasserspeicherung abgezogen werden. Dazu wurden Simulationen aus sogenannten Landoberflächenmodellen (LOM) verwendet, also hydrologischen Modellen, welche die Wasserspeicherung an der Erdoberfläche in Abhängigkeit von meteorologischen Randbedingungen berechnen. Da auch diese Modelle mit Unsicherheiten behaftet sind, wurden die Resultate von sechs unterschiedlichen Modellen berücksichtigt (CLM, MOSAIC, VIC, NOAH, ISBA-TRIP, WGHM). Um die Daten dieser Modelle von den gefilterten GRACE-Signalen abziehen zu können, wurden erstere auf die gleiche Weise gefiltert (d.h. mit denselben sieben Filtern) wie die GRACE-Daten (Abb. 2b). Das Restsignal, dessen Amplitude reskaliert wurde, um den Filtereffekt wieder zu entfernen, wurde dann als Gletscheränderungssignal interpretiert. Mögliche Effekte der postglazialen Landhebung auf die Massenab-

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Charakteristika der einzelnen Methodengruppen
 Table 1: Overview of the most important characteristics of the different methods

	GRACE	ICESat	direkte Messungen
Gemessene Größe	Schwerefeld	Oberflächenhöhe	Gletschermassenbilanz
zeitliche Abdeckung	2002-heute	2003-2009	gletscherabhängig
zeitliche Auflösung	monatlich	saisonal	saisonal/jährlich
Abdeckung	global	diskret (linienförmig)	punktuell
räumliche Auflösung	> 100 km	ca. 100 m	ca. 1 m
Herausforderung	Signalzuweisung	räumliche Aggregation	Regionalisierung

schätzung wurden vernachlässigt. Durch das Berücksichtigen von drei unterschiedlichen Auswertungszentren, sieben unterschiedlichen Filtern und sechs unterschiedlichen LOM ergeben sich insgesamt 126 Möglichkeiten, das gewünschte Signal zu schätzen (Abb. 2c). Betrachtet man alle Möglichkeiten als gleichwertig, ergibt die Schätzung für den Zeitraum 2003 bis 2009, der aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den restlichen Methoden gewählt wurde, eine Gletschermassenänderung im Tien Shan-Gebirge von $-6,7 \pm 5,4$ Gigatonnen pro Jahr. Die Resultate in Abb. 2c zeigen jedoch auch, dass nach diesem Zeitraum eine weniger negative Massenbilanz zu verzeichnen war.

ICESat-basierte Abschätzungen

Der von der NASA betriebene Satellit ICESat führte im Zeitraum 2003 bis 2009 Messungen mit einem Laseraltimeter durch. Ein Laseraltimeter misst den Abstand zwischen der Erdoberfläche und dem Satelliten mit hoher Genauigkeit. Hieraus können Karten der Geländehöhe entlang der Flugbahnen des Satelliten erstellt werden. Durch das Wiederholen der Flugbahnen über mehrere Jahre lassen sich so Höhenänderungsraten ableiten – die Grundlage für geodätische Massenbilanzbestimmungen. Ursprünglich für Massenbilanzabschätzungen in den Polarregionen konzipiert, haben sich die Daten auch in den mittleren Breiten bewährt. Problematisch ist allerdings der relativ große

seitliche Abstand der Flugbahnen in diesen Regionen, welcher die räumliche Aggregation der Daten erschwert. In der Literatur sind drei unterschiedliche Methoden zu finden, um aus ICESat-Daten Höhenänderungsraten zu ermitteln (z.B. Gardner et al., 2013). Bei der ersten werden die ICESat-Messungen mit einem DHM, welches zu einem bekannten Zeitpunkt erstellt wurde, verglichen und für jeden Punkt eine Höhenänderung berechnet. Dividiert durch die Zeit zwischen der DHM-Erstellung und der ICESat-Messung ergibt sich eine Änderungsrate. Bei der zweiten und dritten Methode werden hingegen nur ICESat-Messungen verwendet und diese gegen die Zeit aufgetragen. Der Trend in den Messungen ergibt die gesuchte (mittlere) Änderungsrate. Der Unterschied zwischen der zweiten und dritten Methode besteht lediglich darin, dass entweder Messungen, die im Winter oder Messungen, die im Sommer entstanden sind, berücksichtigt werden. Problematisch bei den Wintermessungen ist, dass die Schneedecke das Lasersignal auf unbekannte Weise beeinflusst.

Da in den Gebieten des Tien Shan der typische Abstand zwischen benachbarten ICESat-Spuren im Bereich von einigen zehn Kilometern liegt (Abb. 3), reichen die ICESat-Messungen allein nicht aus, um eine flächendeckende Änderungsrate zu bestimmen. Deswegen wurde anhand der Daten eine Beziehung zwischen Höhe des Messpunkts und Änderungsrate hergeleitet. Für jede der oben genannten Methoden wurden drei unter-

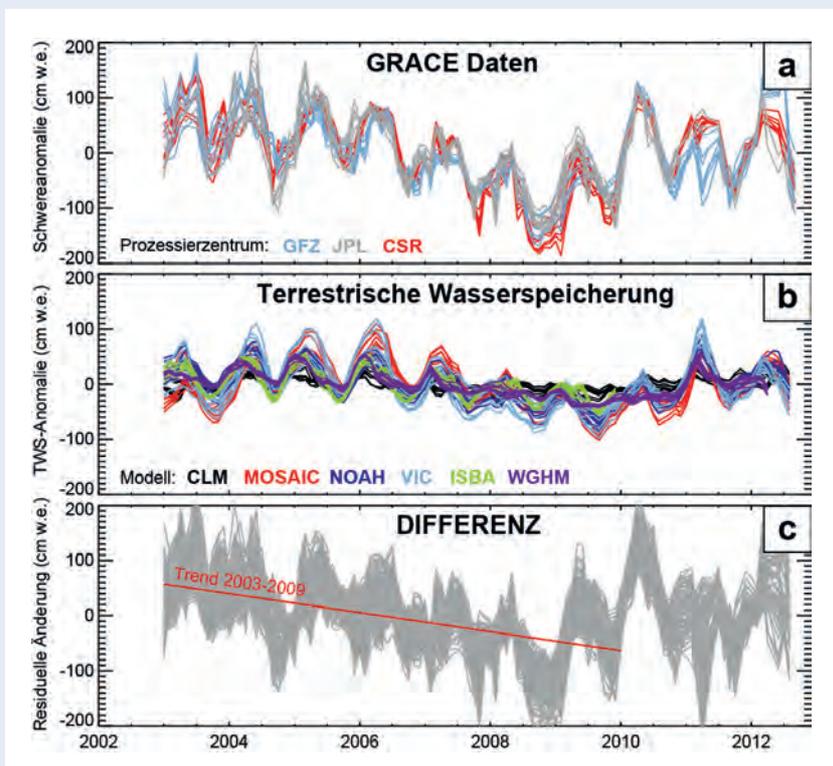


Abb. 2: Zeitreihen der Änderungen im Schwerefeld (a) und in der modellierten terrestrischen Wasserspeicherung (b). Die unterschiedlichen Farben zeigen die Lösung unterschiedlicher Prozessierungszentren, resp. unterschiedlicher Landoberflächen-Modelle. Verschiedene Linien gleicher Farbe zeigen das Resultat unterschiedlicher Filtermethoden. In (c) ist die Differenz zwischen (a) und (b) gezeigt. Die rote Linie zeigt den Trend während der Messperiode 2003 bis 2009, in welcher auch ICESat-Daten zur Verfügung stehen.

Fig. 2: Time series for the deviation in (a) gravity and (b) modeled terrestrial water storage. In (a) and (b) the different colors show the results for different processing centers and different land surface models, respectively. Different lines of the same color show the results for different filtering techniques. Panel (c) shows the deviation between (a) and (b). The red line shows the trend in the period 2003-2009, for which ICESat data are available.

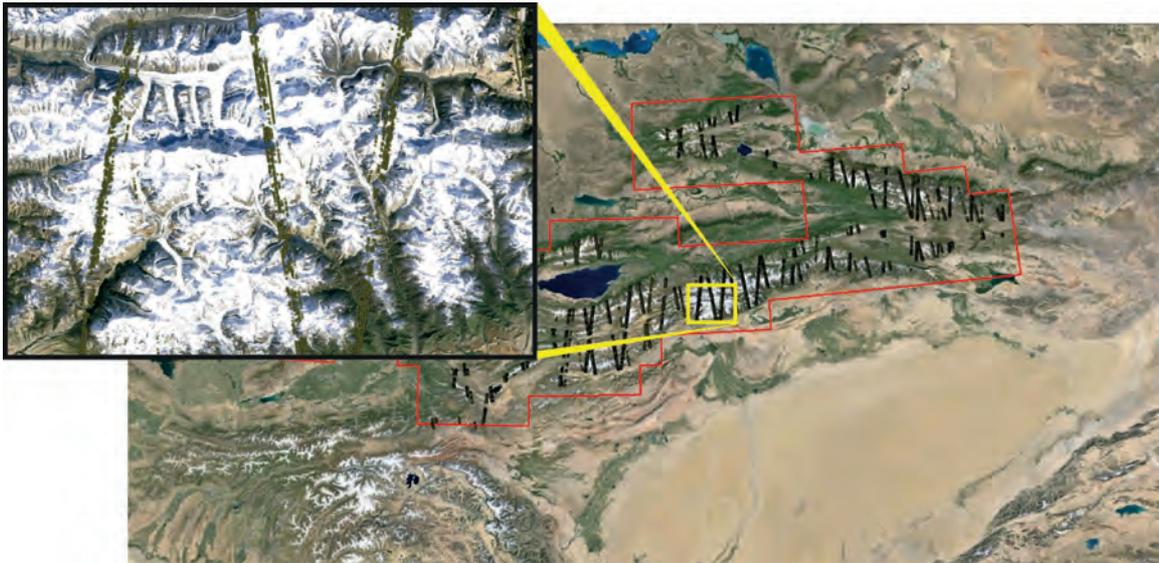


Abb. 3: Räumliche Verteilung der zur Verfügung stehenden ICESat-Daten. Gezeigt sind sämtliche Laseraltimetrie-Messpunkte (schwarz), die im Tien Shan über vergletscherten Flächen liegen. Der Ausschnitt oben links ist eine Vergrößerung im Gebiet des Inylchek-Gletschers.

Fig. 3: Spatial distribution of the available ICESat data. The figure shows all laser measurement points (black) which lie over glaciers in the Tien Shan. The top left panel is an enlargement of the region around Inylchek Glacier

schiedliche Beziehungen erstellt, damit ergeben sich insgesamt neun Möglichkeiten für die Abschätzung der gesuchten Funktion. Da die Lage der Gletscher inklusive ihrer Höhenverteilung bekannt ist, kann in einem zweiten Schritt die Beziehung zwischen Höhe und Änderungsrate verwendet werden, um eine regionale Abschätzung zu generieren. Die Umrechnung von Volumen- auf Massenänderung erfolgt schließlich über die Annahme einer Schnee- und Eisdichte. Aus den beschriebenen Verfahren und wieder dem Prinzip der Ensemble-Schätzung folgend, ergibt sich für den Zeitraum 2003 bis 2009 eine Gletschermassenänderung von $-7,6 \pm 5,1$ Gigatonnen pro Jahr – also geringfügig negativer als bei den GRACE-basierten Ansätzen.

Auf direkten Massenbilanzmessungen basierende Abschätzungen

Von den sieben Gletschermassenbilanz-Messreihen, die einst in Zentralasien bestanden, wurden im Zeitraum 2003 bis 2009 nur zwei fortgeführt. Kombiniert mit den Daten aus dem Zeitraum 1970 bis 1991 ergibt sich aber die Möglichkeit, auch aus diesen Daten eine Serie von Schätzungen für das Gesamtgebiet abzugeben. Der erste Schritt besteht dabei darin, die nicht fortgeführten Messreihen in ihrer zeitlichen Abdeckung

zu erweitern. Dafür wurden sechs unterschiedliche Methoden betrachtet: In der ersten wird der Mittelwert einer Zeitreihe übernommen. In der zweiten wird ein linearer Trend an den Zeitraum 1970 bis 1991 angepasst und in den Zeitraum 2003 bis 2009 extrapoliert. In der dritten wird ein konstantes Verhältnis zwischen den Massenbilanzen der zwei noch gemessenen Gletscher und den restlichen ermittelt, welches dann auf die Messungen des Zeitraums 2003 bis 2009 angewendet wird. In der vierten wird anstelle eines konstanten Verhältnisses eine lineare Regression zwischen den Zeitreihen durchgeführt. Die beiden Zeitreihen der noch gemessenen Gletscher dienen dabei als Eingangsvariablen. Die fünfte und sechste Methode sind hingegen wesentlich komplizierter und beruhen auf Modellrechnungen: Für jeden Gletscher wird ein Modell aufgestellt, das aus meteorologischen Daten Schneefall und Schmelze simuliert. Die Parameter des Modells werden dabei so angepasst, dass die Massenbilanzmessungen für den Zeitraum 1970 bis 1991 optimal reproduziert werden. Sind die Parameter einmal bestimmt, kann das Modell verwendet werden, um die Massenbilanz im Zeitraum 2003 bis 2009 zu berechnen. Der Unterschied zwischen der fünften und sechsten Methode besteht darin, dass einmal nur Jahresbilanzmessungen (d.h. Gletschermassenbilanzmessungen zwischen dem Ende eines Sommers und dem Ende des Sommers im Folgejahr) und einmal

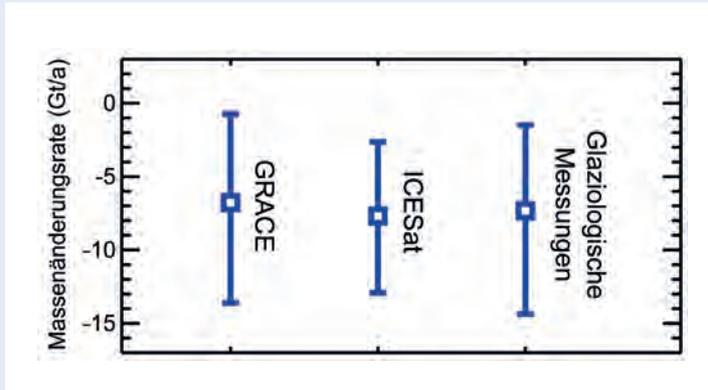


Abb. 4: Übersicht der Resultate, welche von den verschiedenen Methodengruppen geliefert werden. Die Balken zeigen ein 95 %-Konfidenzintervall an.

Fig. 4: Summary of the results yielded by the three groups of methods. The bars indicate a 95 % confidence interval.

sowohl Jahres- wie auch Winterbilanzmessungen (d. h. Messungen zwischen dem Ende eines Sommers und dem Ende eines Winters eines gleichen Jahrs) zur Modellkalibrierung verwendet wurden. Der zweite Schritt des Verfahrens besteht darin, die Massenbilanzzeitreihe, die nun für sieben Gletscher erstellt wurde, auf das Gesamtgebiet zu übertragen. Hierfür wurden drei unterschiedliche Methoden angewendet. Für die ersten vier Methoden des ersten Schritts wurden die jährlichen Massenbilanzen an sich räumlich extrapoliert, während für die Methoden fünf und sechs nur die Modellparameter übertragen wurden. Insbesondere heißt dies, dass für die letzten beiden Methoden jeder der etwa 13 000 Gletscher einzeln modelliert wurde.

Den unterschiedlichen Methoden zufolge betrug die Gletschermassenbilanz des Tien Shan in den Jahren 2003 bis 2009 $-7,3 \pm 6,1$ Gigatonnen pro Jahr, was in Anbetracht der geschätzten Unsicherheit mit den GRACE- und ICESat-basierten Messungen gut übereinstimmt (Abb. 4).

Zusammenfassende Ergebnisse

Die Schätzungen aus GRACE, ICESat und direkten Massenbilanzdaten können als unabhängig betrachtet werden. Die Tatsache, dass alle drei Methodengruppen zu einem ähnlichen Schluss führen, stärkt das Vertrauen in die Schätzungen. Führt man alle Ergebnisse zusammen, so kann die Gletschermassenbilanz des Tien Shan im Zeitraum 2003 bis 2009 mit $-7,1 \pm 5,6$ Gigatonnen pro Jahr angegeben werden. Während der genannten Periode wäre damit ein Wasservolumen abgeschmolzen, welches ausreichen würde, um den Bodensee einmal komplett zu füllen. Dieses Resultat klingt zunächst alarmierend, es muss jedoch betont werden, dass es sich auf einen sehr begrenzten Zeitraum von sieben Jahren bezieht. Die Frage nach der längerfristigen Entwicklung der Gletschermassenbilanz und damit der Wasserverfügbarkeit in dieser Region ist damit noch nicht geklärt. Eine Antwort darauf kann nur durch ein langfristiges Weiterführen der boden- und satellitengestützten Messungen gegeben werden. Die Kooperationen des GFZ mit europäischen und zentralasiatischen Partnern legen dafür den Grundstein.

Die vom GFZ gemeinsam mit US-Kolleginnen und -Kollegen geplante GRACE-Nachfolgemission „GRACE-FO“ wird voraussichtlich 2017 starten. Eine moderne Instrumentierung des neuen Satellitenpaars wird eine deutlich höhere räumliche wie auch zeitliche Auflösung in der Schwerefeldberechnung ermöglichen und somit zu einer verbesserten Abschätzung der Massenbilanz beitragen.

Literatur

- Dahle, C., Flechtner, F., Gruber, C., König, D., König, R., Michalak, G., Neumayer, K.-H. (2012): GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005, (Scientific Technical Report - Data, 12/02), Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 20 p., 10.2312/GFZ.b103-12020.
- Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, W. T., Kaser, G., Ligtenberg, S. R. M., Bolch, T., Sharp, M. J., Hagen, J. O., van den Broeke, M. R., Paul, F., (2013): A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. - Science, 340, 6134, 852-857, 10.1126/science.1234532.
- Hagg, W., Mayer, C., Lambrecht, A., Kriegel, D., Azizov, E. (2013): Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan. - Global and Planetary Change, 110, Part A, 40-50, 10.1016/j.gloplacha.2012.07.010.
- Hoelzle, M., Azizov, E., Barandun, M., Hagg, W., Huss, M., Kriegel, D., Machguth, H., Mandychev, A., Merkushkin, A., Moldobekov, B., Schöne, T., Thoss, H., Vorogushyn, S., Zemp, M. (2012): Re-establishment of long-term glacier monitoring in Kyrgyzstan and Uzbekistan, Central Asia, (Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-10206, 2012), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2012).
- Kriegel, D., Mayer, C., Hagg, W., Vorogushyn, S., Dühmann, D., Gafurov, A., Farinotti, D. (2013): Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia. - Global and Planetary Change, 110, Part A, 51-61, 10.1016/j.gloplacha.2013.05.014.
- Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Dühmann, D., Mandychev, A., Merz, B. (2013): What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. - Global and Planetary Change, 110, Part A, 4-25, 10.1016/j.gloplacha.2013.02.004.