

4. GEBIRGSGLETSCHER

Die Bestimmung der Anzahl und Fläche der gegenwärtigen Gletscher stößt auf zahlreiche Schwierigkeiten, u.a. weil viele kleinere Gletscher nicht einmal registriert sind (Kap. 4.1). Das aus gefallenem Schnee entstandene Gletschereis bewegt sich der Schwerkraft folgend hangabwärts und überformt die betroffene Landschaft durch Erosion (Kap. 4.2). Seit dem Ende der Kleinen Eiszeit ist die Vergletscherung in den höheren Breiten auf dem Rückzug, in jüngster Zeit verstärkt durch den Klimawandel (Kap. 4.3). In den mittleren Breiten der Nordhalbkugel finden sich Gletscher wegen des milderen Klimas nur noch in Hochgebirgen, so im Himalaya (Kap. 4.5) und in den Alpen (Kap. 4.6, 4.7 und 4.8), wo sich ebenfalls die Gletscherfläche verringert. In noch größeren Höhen liegen die vergleichsweise wenigen Gletscher der Tropen in Afrika, Neuguinea (Kap. 4.9) und Südamerika (Kap. 4.10 und 4.11), die ebenfalls zunehmend kleiner werden. Wahrscheinlich wird die globale Erwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts das Abschmelzen der Gletscher weltweit beschleunigen, mit einem Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg von 15 bis 21 cm (Kap. 4.12).

4.1 Kartierung von Gletschern mit Satellitendaten und das globale Gletscherinventar

FRANK PAUL

Kartierung von Gletschern mit Satellitendaten und das globale Gletscherinventar: Gletscheränderungen gelten als hervorragende Klimaindikatoren und ihre derzeitige starke Schmelze trägt substantiell zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Die genaue Erfassung ihrer Änderungen ist allerdings sehr aufwendig, da sie sich zum einen in zumeist schwer zugänglichen Gebirgsregionen befinden und zum anderen ein genauer Referenzdatensatz (ein Gletscherinventar) bis vor kurzem nicht verfügbar war. Mit Hilfe der seit einiger Zeit frei verfügbaren Aufnahmen des Satelliten Landsat und automatisierter Klassifikation von Gletscherflächen wurde das globale Gletscherinventar nun vervollständigt und den Forschern für Berechnungen aller Art zur Verfügung gestellt. Damit gelang es zum ersten Mal sowohl die genaue Fläche (727.000 km²) und Anzahl (200.000) aller Gletscher zu bestimmen, als auch ihren potenziellen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg (41 cm) sowie ihre vergangene und zukünftige Entwicklung zu modellieren. Dabei zeigte sich, dass die nur für wenige Gletscher vorliegenden langen Messreihen der Feldbeobachtungen ideal durch die sehr viel kürzeren aber räumlich vollständigen Zeitreihen aus Fernerkundungsdaten ergänzt werden.

Mapping of glaciers with satellite data and global glacier inventory: Glacier changes are considered as reliable climate indicators and their current strong melting is contributing substantially to global sea-level rise. The precise determination of their changes is however challenging, as they are mostly located in remote mountain regions with difficult access and a suitable reference dataset (a glacier inventory) has not been available until recently. Using the now freely available images of the Landsat satellite sensor and semi automated glacier classification, the global glacier inventory could be completed and shared with scientists for their research. This allowed for the first time to determine the total area and number of all glaciers world wide, as well as to model their potential contribution to sea-level rise along with their past and future development. These applications confirmed the complimentary nature of the long-term field measurements on selected glaciers with the much shorter but spatially complete record of remote sensing observations.

Gletscher finden sich fast überall auf der Welt. Von den Polarregionen, wo sie bis auf den Meeresspiegel hinab reichen, bis zu den Tropen, wo man sie auf den höchsten Gipfeln findet (Abb. 4.1-1). Da Gletscher aus zusammengepresstem Schnee entstehen, braucht es mindestens drei Voraussetzungen, damit sich ein Gletscher bilden kann: Niederschlag in Form von Schnee, eine nicht zu steile Fläche, auf der sich der Schnee ansammeln kann, und genügend tiefe Temperaturen, damit der Schnee dort viele Sommer überdauern kann. Diese

Bedingungen trifft man vor allem in den Polar- bzw. Gebirgsregionen an. Je nach Niederschlagsmenge und Höhe der Berge bzw. Gebirge entstehen mehr oder weniger ausgedehnte vergletscherte Regionen. Gletscher sind damit ein zwar global verbreitetes, insgesamt aber hauptsächlich lokal bzw. regional vorkommendes Phänomen. Aufgrund ihrer heterogenen globalen Verbreitung in zumeist nur schwer zugänglichen Gebirgsregionen sind Satellitendaten besonders gut geeignet, um ihre Ausdehnung und Veränderungen zu erfassen.

Gletscheränderungen sind nicht nur herausragende Indikatoren für den Klimawandel (VAUGHAN et al. 2013), sondern auch bedeutend für die Hydrologie auf regionaler (Wasserkraft, Bewässerung) und globaler Skala (Meeresspiegelanstieg). Zudem kann sich durch Gletscheränderungen das Potenzial für Naturgefahren erhöhen, z.B. wenn sich an der zurückweichenden Gletscherfront große Seen bilden, die ausbrechen können (z.B. RICHARDSON & REYNOLDS 2000). Die genaue Erfassung von Gletscheränderungen erfordert sowohl einen genauen Basisdatensatz (ein Gletscherinventar), gegenüber welchem die Veränderungen ermittelt werden können, als auch die wiederholte Beobachtung großer Regionen. Während die regelmäßige Vermessung von Längenänderung und Massenbilanz im Feld eine lange Tradition hat, aber nur für einige hundert Gletschern zur Verfügung steht (ZEMP et al. 2015), decken Satellitenmessungen nur einen kurzen Zeitraum ab, erfassen dabei aber große Regionen vollständig. Mit Hilfe von Gletscherinventaren können die isolierten Feldmessungen auf eine ganze Gebirgsregion extrapoliert werden. Dies wird insbesondere für regionale oder globale Abschätzungen von Gletscheränderungen angewandt, z.B. wenn es darum geht ihren Beitrag zum Meeresspiegelanstieg abzuschätzen (GARDNER et al. 2013).

Da die Erstellung eines Gletscherinventars ziemlich aufwändig ist, wurde ein global vollständiger Datensatz von guter Qualität erst kürzlich mit Hilfe von frei verfügbaren Satellitendaten fertig gestellt (PFEFFER et al. 2014). Dieser Beitrag beschreibt die dafür verwendeten Datensätze und Methoden sowie die zur Umwandlung der Gletscherumrisse in ein Inventar erforderlichen Schritte. Zudem wird die Erstellung des globalen Glet-

scherinventars beleuchtet und einige wichtige Anwendungen dieses Datensatzes beschrieben.

Satellitendaten

Wie zuvor bereits erwähnt, spielen Satellitendaten eine zentrale Rolle bei der Erstellung von Gletscherinventaren und der Erfassung von Gletscheränderungen (z.B. PAUL 2010). Aus der Fülle von Sensoren die im Weltall regelmäßig die Erde beobachten, kommen allerdings nur wenige für die Gletscherkartierung in Frage. Dies sind im Wesentlichen optische Sensoren mit etwa 10–30 m räumlicher Auflösung, welche auch im kurzwelligen Infrarot Strahlung registrieren. Dabei bedeutet 'optisch', dass die Sensoren von der Erde reflektierte Sonnenstrahlung aufzeichnen und deshalb nur von der Tagesseite der Erde Aufnahmen machen. Thermische Sensoren hingegen registrieren auch die von der Erde gemäß ihrer Temperatur abgestrahlte Infrarotstrahlung. Satelliten mit Radarsensoren 'bestrahlen' die Erde selber und registrieren das reflektierte Signal mit großen Antennen. Diese sog. aktiven Sensoren (im Gegensatz zu den passiven optischen und thermischen Sensoren) sind unabhängig vom Tageslicht und können die Erdoberfläche auch Nachts und durch Wolken hindurch aufnehmen.

Die für die Gletscheranalyse erforderliche hohe räumliche Auflösung bedingt, dass nur polarumlaufende Satelliten (Höhen zwischen 400 und 800 km) verwendet werden können. Diese sind zumeist sonnensynchron, d.h. sie erfassen jedes Gebiet auf der Erde zur etwa gleichen Tageszeit (etwa 10:30 Uhr morgens). Da Gletscher nicht nur sehr klein (0,01 km²) sondern auch sehr groß (10.000 km²) sein können, sollte der Sensor

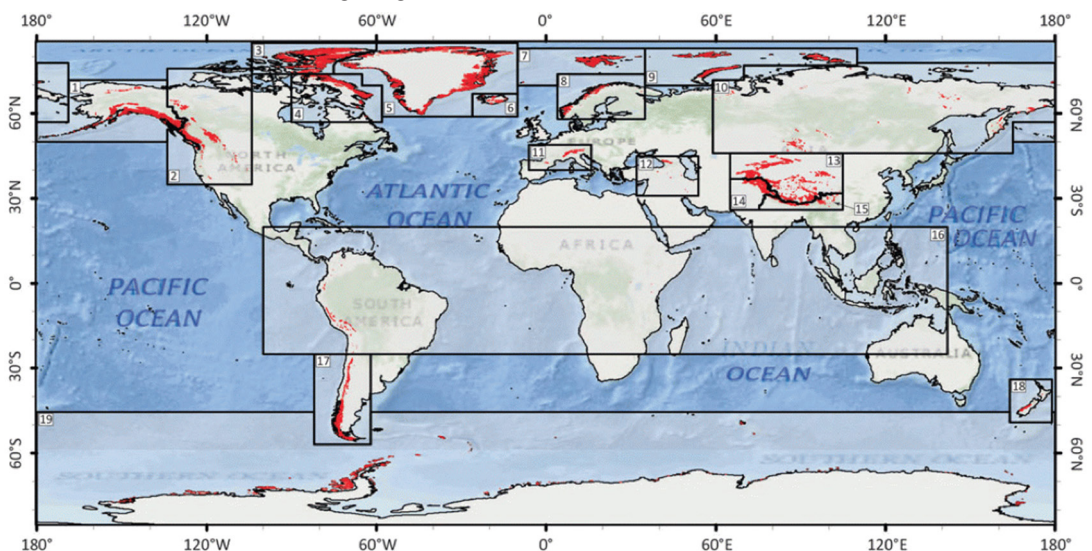


Abb. 4.1-1: Globale Verbreitung der Gletscher (rot) und Abgrenzung der 19 physio-geographischen Regionen (PFEFFER et al. 2014).

auch ein möglichst großes Gebiet auf einmal erfassen. Um wolkenfreie Szenen vom Ende der sommerlichen Schmelzperiode zu erhalten, muss der Satellit die gleiche Region möglichst oft überfliegen und für die Bestimmung von Veränderungen kontinuierlich Daten über Jahrzehnte liefern. Für die praktische Anwendung im globalen Maßstab ist es zudem erforderlich, dass die Daten frei verfügbar sind und bereits orthorektifiziert sind, d.h. das durch den schrägen Blickwinkel und die Topographie hervorgerufenen Verschiebungen der Position einzelner Pixel mit einem digitalen Höhenmodell (DHM) korrigiert wurden. Zur Zeit (und seit etwa 30 Jahren) gibt es nur einen Satelliten, der all diese Erfordernisse erfüllt: Landsat mit seinen Sensoren *Thematic Mapper* (TM) auf Landsat 4 und 5 (1984-2011), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) auf Landsat 7 (1999-heute) und seit 2013 auf Landsat 8 der *Operational Land Imager* (OLI), eine Weiterentwicklung des ETM+ Sensors. Alle Daten dieser Sensoren sind seit einigen Jahren frei verfügbar vom USGS und erfreuen sich trotz ihrer nur mittleren Auflösung von 30 m grosser Beliebtheit bei Wissenschaftlern (WULDER et al. 2012). Insbesondere das Erstellen von Gletscherinventaren in allen Regionen der Welt ist eine weit verbreitete Anwendung (z.B. BOLCH et al. 2010, FREY et al. 2012, RASTNER et al. 2012, PAUL et al. 2011, GUO et al. 2015). Doch wie werden aus den Satellitendaten Gletscherumrisse abgeleitet?

Gletscherkartierung

Das automatische Kartieren vom Gletschern mit optischen Sensoren ist technisch relativ einfach, da Schnee und Eis im Vergleich zu anderen Oberflächen ein sehr spezielles Reflexionsvermögen haben. Während sie im sichtbaren Spektralbereich relativ hell sind, d.h. den Großteil des einfallenden Sonnenlichtes re-

flektieren, erscheinen Schnee und Eis im kurzwelligen Infrarot sehr dunkel, da sie in diesem Wellenlängenbereich fast alle Strahlung absorbieren. Die in diesen Spektralbereichen angeordneten Sensoren ermöglichen dadurch eine einfache Kartierung von Gletschern: Teilt man die hohen Grauwerte von Eis und Schnee im Kanal 3 (Abb. 4.1-3a) von TM (TM3) durch die sehr niedrigen im kurzwelligen Infrarot von TM5 (Abb. 4.1-3b), resultieren im Verhältnisbild sehr hohe Grauwerte über Eis und Schnee und sehr niedrige über anderem Gelände (Abb. 4.1-3c), da dieses in TM3 eher dunkel und in TM5 eher hell ist, d.h. man teilt niedrige Zahlen durch hohe Zahlen. Mit einem einfachen Schwellwert lässt sich daraus eine schwarz-weiß Gletschermaske erstellen (Abb. 4.1-3d) welche noch mit einem Filter geglättet werden kann, um verrauschte Regionen oder kleine Fehlklassifikationen (etwa Löcher in der Kartierung durch eine Mittelmoräne) zu beseitigen. Die so erstellte Maske wird mit einer sog. Raster-Vektor-Konvertierung in Gletscherumrisse umgewandelt (Abb. 4.1-3e).

Diese wird anschließend über das originale Satellitenbild (allenfalls kontrastverstärkt und in Falschfarbendarstellung) gelegt und allfällige Fehlklassifikationen werden von Hand korrigiert (Abb. 4.1-3f). Insbesondere werden dabei Gewässerpolygone (Seen, Flüsse) entfernt und schuttbedeckte Gletscherbereiche ergänzt. Letzteres kann in einigen Regionen der Welt (z.B. im Himalaya und Karakoram) sehr aufwendig sein, da es dort viele stark schuttbedeckte Gletscher gibt (Abb. 4.1-4) und man diese Bereiche oftmals nur schwer identifizieren kann (z.B. gibt es durch den hohen Sonnenstand kaum durch das Relief hervorgerufene Beleuchtungsunterschiede). In Regionen mit vielen Eiskappen wie z.B. Grönland oder Norwegen (Abb. 4.1-5) ist dies sehr viel einfacher, da diese wegen fehlender



Abb. 4.1-2: Der Oberaargletscher in den Berner Alpen zeigt deutlich die Reflexionsunterschiede von Schnee und blankem Eis im sichtbaren Spektralbereich sowie die Schwierigkeiten einer genauen Abgrenzung im Bereich mit Schuttbedeckung (unten links im Bild).

eisfreier Felswände welche den Schutt liefern könnten zumeist schuttfrei sind (PAUL et al. 2011, RASTNER et al. 2012). In hohen geographischen Breiten gibt es dafür ein anderes Problem: Durch den tiefen Sonnenstand können tiefe Schlagschatten zum Zeitpunkt der maximalen Ausaperung die Kartiergenauigkeit beeinflussen. Hier muss ein Kompromiss zwischen möglichst hohem Sonnenstand und möglichst wenig Schnee gefunden werden. In polaren Regionen sind Gletscherzungen dann häufig noch von Eisbergen und Meereis umgeben. Diese werden spektral korrekt ebenfalls als Gletscher kartiert und müssen bei der anschließenden manuellen Korrektur wieder entfernt werden.

Letzteres deutet bereits an, dass die Auswahl geeigneter Szenen (z.B. earthexplorer.usgs.gov oder glovis.usgs.gov) ein sehr kritischer Punkt ist. Von äußerster Wichtigkeit dabei ist es nur Szenen zu verwenden, in denen der Schnee soweit geschmolzen ist, dass er den Gletscherrand nicht verdeckt. Das kann in einigen Regionen sehr schwierig sein weil auch im Sommer in hohen Lagen immer wieder Schnee fällt oder die Hauptschmelzperiode mit der Regenzeit zusammenfällt (z.B. in tropischen Klimaten oder vom Monsun beeinflussten Regionen). Auch Wolken stellen ein Problem dar, können aber im Allgemeinen durch Kombination mehrere Szenen umgangen werden. Letzteres ist oftmals auch die einzige Möglichkeit um die ab Juni 2003 in den ETM+

Szenen auftretenden Fehlstreifen zu reduzieren oder gar zu beseitigen. Der zeitliche Abstand zwischen den kombinierten Szenen sollte in diesem Fall möglichst klein sein. In Regionen mit mehrheitlich sehr kleinen Gletschern ($<0,1 \text{ km}^2$) kann es zudem sinnvoll sein Luftbilder (mit z.B. 0,5 m Auflösung) oder hochaufgelöste Satellitenbilder anstelle der Landsat Szenen (mit 30 m) für die Kartierung zu verwenden. Dies erfordert allerdings eine vollständige Digitalisierung von Hand, welche für mehrere tausend Gletscher sehr aufwendig ist (KIENHOLZ et al. 2015, FISCHER et al. 2014).

Vom Gletscherumriss zum Inventar

Um aus den Gletscherumrissen ein Inventar zu machen, braucht es noch ein digitales Höhenmodell (DHM) und einige weitere Prozessierungsschritte. Ein Gletscherinventar verzeichnet für jeden einzelnen Gletscher ein Reihe von Kenngrößen oder Parametern um ihn zu charakterisieren. Neben einem eindeutigen Code, Koordinaten, Name und Fläche gehören dazu auch Angaben zu Länge, Exposition, Neigung sowie die höchste, tiefste und mittlere Höhenlage des Gletschers (KIENHOLZ et al. 2015, PAUL et al. 2009). Um derartige gletscherspezifische Angaben zu erhalten ist es zunächst erforderlich die einzelnen Gletscher aus dem 'Eiskuchen' zu isolieren, welcher aus den Satellitendaten abgeleitet wurde. Hierzu berechnet man hydrologische Einzugsgebiete und Wasserschei-

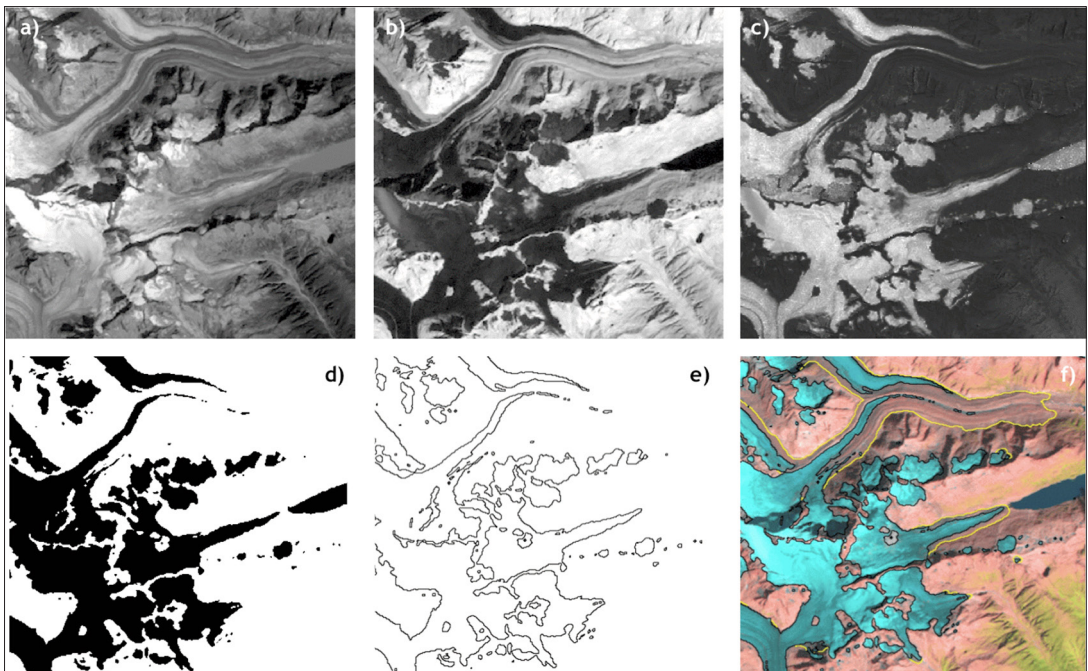


Abb. 4.2-3: Gletscherkartierung mit der 'band ratio' Methode am Beispiel des Oberaargletschers (Abb. 4.1-2). **a)** Kanal TM3 (rot), **b)** Kanal TM5 (kurzwelliges Infrarot), **c)** Verhältnisbild, **d)** schwarz-weiß Gletschermaske, **e)** Umrisse nach Raster-Vektor Konvertierung, **f)** Umrisse (gelb) nach manueller Korrektur der schuttbedeckten Bereiche.

den (Abb. 4.1-6 *Links*) aus einem DHM (z.B. BOLCH et al. 2010, KIENHOLZ et al. 2013) und verschneidet diese dann digital mit den Gletscherumrissen (PAUL et al. 2002). Für diesen Schritt ist es sehr sinnvoll wenn das DHM das Gleiche ist wie das für die Orthorektifizierung der Satellitenbilder verwendete. Andernfalls kann es lokal zu Überschneidungen der Einzugsgebietsgrenzen mit den Gletscherumrissen kommen, welches eine Vielzahl separater Minieisflächen erzeugen würde. Die Unterteilung in einzelne Gletscher (Abb. 4.1-6 *Rechts*) hat einen gewissen Interpretationsspielraum und Inventare der gleichen Region aber von unterschiedlichen Bearbeitern sind deshalb nicht immer konsistent. Insbesondere bei Eiskappen (s. Abb. 4.1-5) macht eine Unterteilung in einzelne Gletscher allerdings nicht immer Sinn (s. Kap. 6 Eisschilde in diesem Band). Für hydrologische Berechnungen ist sie allerdings erforderlich.

Nachdem jeder Gletscher von seinen Nachbarn digital abgegrenzt wurde, können die oben erwähnten gletscherspezifischen Parameter bestimmt werden. Das geht mit einem GIS relativ einfach da jeder Gletscher als eine Zone betrachtet wird über die Daten aus einer anderen Quelle statistisch gemittelt werden. Aus dem DHM erhält man so für jeden Gletscher die minimale, maximale, mittlere und die median Höhe (siehe PAUL et al. 2009). Weitere wichtige Größen wie z.B. die Länge oder die Flächen-Höhenverteilung (Hypsometrie) eines Gletschers lassen sich mit Zusatzprogrammen bestimmen (z.B. MACHGUTH et al. 2014). Wenn alle Daten erstellt und allenfalls publiziert sind können sie in die GLIMS Datenbank (Global Land Ice Measurements from Space) integriert werden wo sie standardisiert und

allen Interessenten zur Verfügung gestellt werden. Damit ist die langfristige Verfügbarkeit des Inventars auch nach Abschluss eines Projektes sichergestellt.

Das globale Gletscherinventar

Ein erstes globales Gletscherinventar (World Glacier Inventory, WGI) wurde bereits in den 1970er und 1980er Jahren für hydrologische Zwecke zusammengestellt. Es basiert im Wesentlichen auf Gletscherdaten welche planimetrisch aus topographischen Karten herausgelesen wurden und enthielt für etwa 1/3 aller Gletscher auf der Welt detaillierte Informationen. Da es damals noch kein GIS gab, wurden diese Daten einem Koordinatenpunkt zugeordnet, in Tabellen verzeichnet und auf Lochstreifen abgespeichert. Ohne eine Kopie der damals verwendeten Karte ist es oftmals allerdings sehr schwierig dem Koordinatenpunkt einem Gletscher zuzuordnen und gletscherspezifische Änderungen zu bestimmen. Erst die Einführung von Computern mit grafischer Benutzeroberfläche und GIS erlaubte die Vektorisierung der Umrisse und deren Überlagerung mit beliebigen anderen geokodierten Daten. Da Gletscher und ihre Änderungen in den letzten zwei Jahrzehnten vor allem wegen ihrer Funktion als Klimaindikator und Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels analysiert werden, war es dringend erforderlich einen global vollständigen Referenzdatensatz zu erstellen. Erste Versuche in diese Richtung wurden mit der Initiative GLIMS gestartet (RAUP et al. 2007), welche zu der Zeit hauptsächlich auf der freien Verfügbarkeit (für GLIMS Teilnehmer) von Szenen des Sensors ASTER auf dem Satelliten Terra beruhte. Erst als 2008 alle



Abb. 4.1-4: Stark schuttbedeckte Gletscher im westlichen Himalaya in der Region des Bagra Shigri Gletschers (Bildmitte bei 32.15° N und 77.65° E). Um die Ausdehnung der Gletscher sichtbar zu machen sind die Umrisse aus dem RGI überlagert. Der Bildausschnitt misst 35,5 auf 28,1 km. Satellitenbild von Landsat ETM+ aufgenommen am 2.8.2002.

Landsatzzenen im USGS Archiv frei verfügbar wurden (WULDER et al. 2012), konnte das bereits in GLIMS vorhandene Inventar global vervollständigt werden.

Im Hinblick auf eine Verfügbarkeit für globale Berechnungen im letzten IPCC Report (VAUGHAN et al. 2013) erstellte eine große Zahl von Forschern für die noch nicht abgedeckten Regionen Gletscherumrisse und stellte diese der Gemeinschaft zur Verfügung (PFEFFER et al. 2014). Der so zusammengestellte Datensatz wurde neutral 'Randolph Glacier Inventory' (RGI) getauft (nach dem Ort eines Vorbereitungstreffens in New Hampshire) und über die GLIMS Webseite (glims.org/RGI) allen Interessierten zur Verfügung gestellt. Aufgrund der seinerzeit gebotenen Dringlichkeit wurden im RGI für einige Regionen auch Datensätze mit weniger guter Qualität akzeptiert (PFEFFER et al. 2014). Seitdem ist die Qualität des RGI laufend verbessert worden (insbesondere in Bezug auf falsch kartierten saisonalen Schnee) und große hochwertige Datensätze wurden neu zur Verfügung gestellt, z.B. für ganz China (GUO et al. 2015). Im Vergleich zur multitemporalen GLIMS Datenbank enthält das RGI für jede Region nur einen Datensatz mit einer reduzierten Zahl von Attributen für jeden Gletscher. Aus praktischen Gründen wurden die vergletscherten Gebiete der Welt in 19, physio-geographisch mehr oder weniger homogene Regionen aufgeteilt. Diese dienen bei globalen Berechnungen als Referenz für regionalskalige Betrachtungen.

Anwendungen und zukünftige Entwicklungen

Das RGI erlaubte zum ersten Mal die Anzahl und Fläche aller Gletscher auf der Welt zu bestimmen. Bezugnehmend auf die Version 3,2 des RGI welche von PFEFFER et al. (2014) verwendet wurde gibt es auf der Erde (ohne die Antarktische Halbinsel) etwa 200.000 Gletscher welche eine Fläche von 727.000 km² bedecken (Tab. 4.1-1). Diese haben ein geschätztes Volumen von 170 km³ welches nach vollständigem Abschmelzen den Meeresspiegel um etwa 0,4 m steigen lassen würde. Die mittlere Dicke der Gletscher ist in den stark vergletscherten Regionen etwa 200-300 m in allen anderen 40-80 m (Tab. 4.1-1). In den neueren Versionen des RGI nimmt die Anzahl der Gletscher zu und die Fläche ab, d.h. die mittlere Dicke und das Volumen werden tendenziell kleiner. Die Flächen-Höhenverteilung zeigt das meiste Eis zwischen 500 und 1500 m (in den Polarregionen) sowie bei ca. 5.500 m für die Tropen und 3.000 m in den Alpen. Weitere interessante Details sind in der frei verfügbaren Publikation von PFEFFER et al. (2014) beschrieben.

Die Gletscherumrisse des RGI wurden bereits in zahlreichen Studien mit globaler Ausrichtung verwendet. Dazu zählen Abschätzungen zum globalen Gletschervolumen (HUSS & FARINOTTI 2012, GRINSTED 2013), zum vergangenen, derzeitigen und zukünftigen Beitrag der Gletscherschmelze zum Meeresspiegelanstieg (MAR-



Abb. 4.1-5: Nahezu schuttfreie Gletscher und Eiskappen in Norwegen (Jostedalsgletscher). In dieser Region (Bildmitte bei 61.65° N und 7.0° E) schränken vor allem Schneefelder und Schlagschatten die Kartiergenauigkeit ein. Satellitenbild von Landsat TM aufgenommen am 16.9.2006.

ZEION et al. 2012, GARDNER et al. 2013, RADIC et al. 2013), zur regionalen Hydrologie (BLISS et al. 2014), und zur Modellierung von Gletscherlängen und Fließlinien (MACHGUTH & HUSS 2014). Diese Studien haben zahlreiche neue Erkenntnisse gebracht welche ihrerseits in weiteren Studien genutzt werden. Mit den weiteren Verbesserungen des RGI werden sich auch einige Kennzahlen bzw. die vom RGI abgeleiteten Resultate noch etwas ändern, die wesentlichen Aussagen dieser Studien wird das allerdings nicht beeinflussen. Mittelfristig ist geplant das RGI in die GLIMS Datenbank zu integrieren damit nur eine Datenbank nachgeführt werden muss.

Eine neue Ära in der Gletscherbeobachtung mit Satellitendaten wurde kürzlich mit dem erfolgreichen Start des ESA Satelliten Sentinel 2a aufgetan. Zusammen

mit dem für das Jahr 2016 geplanten Start des baugleichen Satelliten Sentinel 2b kann alle 5 Tage das gleiche Gebiet mit 10 m Auflösung erfasst werden. Das ist dreimal häufiger und mit dreimal besserer Auflösung als es derzeit mit Landsat 8 möglich ist. Bezüglich der drei Hauptprobleme Schnee, Schuttererkennung auf Gletschern und Wolkenbedeckung werden sich dadurch völlig neue Möglichkeiten und eine weitere Qualitätssteigerung der Beobachtungen ergeben.

Zusammenfassung

Die speziellen optischen Eigenschaften von Eis und Schnee ermöglichen es Gletscher mit Satellitendaten automatisiert zu kartieren und so über große und abgelegene Regionen Gletscherumrisse abzuleiten. Nach

Tab. 4.1-1: Zusammenstellung von Gletscherdaten für die 19 Regionen des RGI (s. Abb. 4.1-1) nach PFEFFER et al. (2014).

RGI-Nr.	Region	Anzahl	Fläche (km ²)	Mittl.Grösse (km ²)	Masse (Gt)	Mittlere Dicke (m)
1	Alaska	26944	86715	3,22	18379	212
2	Kanada West und US	15215	14559	0,96	906	62
3	Kanadische Arktis Nord	4538	104873	23,11	30958	295
4	Kanadische Arktis Süd	7347	40894	5,57	8845	216
5	Grönland	19323	89721	4,64	17146	191
6	Island	568	11060	19,47	3988	361
7	Svalbard & Jan Mayen	1615	33922	21,00	8700	256
8	Skandinavien	2668	2851	1,07	217	76
9	Russische Arktis	1069	51592	48,26	15152	294
10	Nord Asien	4403	3430	0,78	109	32
11	Zentral Europa	3920	2063	0,53	109	53
12	Kaukasus & Mittl. Osten	1386	1139	0,82	72	63
13	Zentral Asien	46543	62606	1,35	4531	72
14	Süd Asien West	22822	33859	1,48	2900	86
15	Süd Asien Ost	16046	21799	1,55	1196	55
16	Niedere Breiten	2863	2346	0,82	145	62
17	Südliche Anden	3537	29333	1,83	6018	205
18	Neuseeland	2752	1162	0,33	72	62
19	Antarktis & Subantarktis	14095	132867	48,28	33749	254
Alle		197654	726791	9,74	153192	153

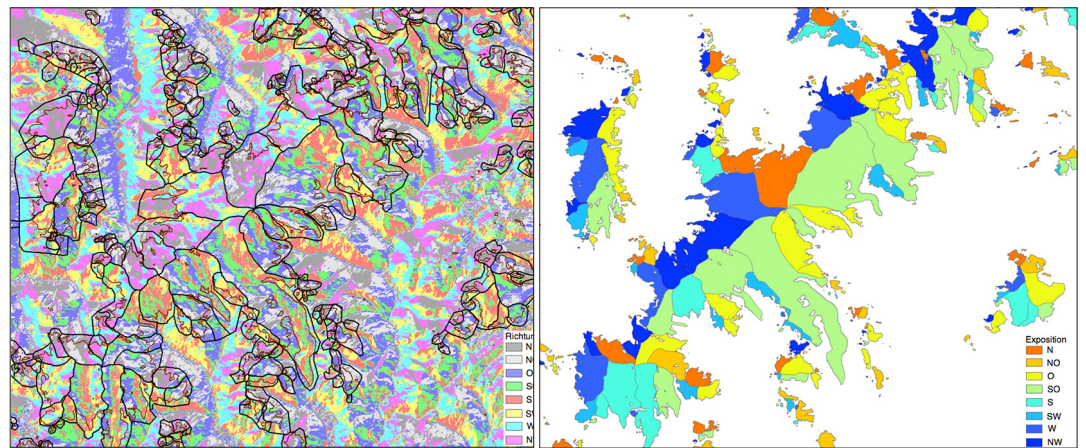


Abb. 4.1-6: Links: Fließrichtungen des Wassers (willkürlich farbkodiert) mit überlagerten hydrologischen Abgrenzungen (schwarz) der Gletscher (dunkelbraun) für das Gebiet des Jostedalsbreen in Norwegen (s. auch Abb. 4.1-5). Rechts: Nach der Verschneidung resultierende Einzelgletscher mit Farbkodierung für den Expositionssektor des jeweiligen Gletschers.

einer manuellen Korrektur von falsch klassierten Bereichen (schuttbedecktes Eis, saisonaler Schnee, Schatten, Wasser, Eisberge, Meereis) und in Kombination mit einem DHM lassen sich einzelne Gletscher abgrenzen und ein Inventar erstellen. Dieses dient dann zum Beispiel als Referenz für die Bestimmung von Gletscheränderungen und für räumliche Extrapolationen von nur lokal ausgeführten Feldmessungen.

Die freie Verfügbarkeit von Landsatdaten und ein spezieller Effort zahlreicher Wissenschaftler hat es in Kombination mit dem bereits vorhandenen Gletscherdaten in der GLIMS Datenbank ermöglicht ein global vollständiges Gletscherinventar zu erstellen (RGI). Dieses wurde für zahlreiche Berechnungen auf globaler Skala verwendet (Gletschervolumen, vergangene und zukünftige Gletscheränderungen, Meeresspiegelbeitrag), welche Eingang in den letzten IPCC Bericht gefunden haben. Da die Qualität des RGI weiterhin verbessert wird, werden sich einige der bisher veröffentlichten Zahlen und Ergebnisse noch verändern. Satellitendaten werden bei den entsprechenden Berechnungen auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Literatur

- BLISS, A., HOCK, R. & V. RADIC (2014): Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change, *J. Geophys. Res. Earth. Surf.* 119, 717-730.
- BOLCH, T., MENOUNOS, B. & R. WHEATE (2010). Land-sat-based glacier inventory of western Canada, 1985-2005. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 127-137.
- FISCHER, M., HUSS, M., BARBOUX, C. & M. HOELZLE (2014): The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 933-945.
- FREY, H., PAUL, F. & T. STROZZI (2012): Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: Methods, challenges and results. *Remote Sensing of Environment*, 124, 832-843.
- GARDNER, A. S., G. MOHOLDT, J. G. COGLEY, B. WOUTERS, A. A. ARENDT, J. WAHR, E. BERTHIER, R. HOCK, W. T. PFEFFER, G. KASER, S. R. M. LIGTENBERG, T. BOLCH, M. J. SHARP, J. O. HAGEN, M. R. VAN DEN BROECKE & F. PAUL (2013): A consensus estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340 (6134), 852-857.
- GRINSTED, A. (2013): An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 7, 141-151.
- GUO, W., LIU, S., XU, J., WU, L., SHANGGUAN, D., YAO, X., WEI, J., BAO, W., YU, P., LIU, Q. & Z. JIANG (2015): The second Chinese glacier inventory: data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 61 (226), 357-372.
- HUSS, M. & D. FARINOTTI (2012): Distributed ice thickness and volume of 180,000 glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research*, 117, F04010.
- KIENHOLZ, C., R. HOCK & A. ARENDT (2013): A new tool for semi-automatic delineation of glacier flow basins. *Journal of Glaciology*, 59 (217), 925-936.
- KIENHOLZ, C., S. J. HERRED, J. L. RICH, A. ARENDT, R. HOCK & E. W. BURGESS (2015): Derivation and analysis of a complete modern-date glacier inventory for Alaska and northwest Canada. *Journal of Glaciology*, 61(227), 403-420.
- MACHGUTH, H. & M. HUSS (2014): The length of the world's glaciers - A new approach for the global calculation of center lines. *The Cryosphere*, 8, 1741-1755.
- MARZEION, B., JAROSCH, A. H. & M. HOFER (2012): Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, 6, 1295-1322.
- PAUL, F. (2010): Towards a global glacier inventory from satellite data. *Geographica Helvetica*, 65 (2), 103-112.
- PAUL, F., KÄÄB, A., MAISCH, M., KELLENBERGER, T. W. & W. HAEBERLI (2002): The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34, 355-361.
- PAUL, F., R. BARRY, G. COGLEY, H. FREY, W. HAEBERLI, A. OHMURA, S. OMMANNEY, B. RAUP, A. RIVERA & M. ZEMP (2009): Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50 (53), 119-126.
- PAUL, F., ANDREASSEN, L. M. & S. H. WINSVOLD (2011): A new glacier inventory for the Jostedalbreen region, Norway, from Landsat TM scenes of 2006 and changes since 1966. *Annals of Glaciology*, 52 (59), 153-162.
- PFEFFER, W. T. & 19 others (2014): The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 60 (221), 537-552.
- RADIC, V., A. BLISS, A. C. BEEDLOW, R. HOCK, E. MILES & J. G. COGLEY (2013): Regional and global projections of the 21st century glacier mass changes in response to climate scenarios from GCMs. *Climate Dynamics*, 42, 37-58.
- RASTNER, P., T. BOLCH, N. MÖLG, H. MACHGUTH, R. LE BRIS & F. PAUL (2012): The first complete inventory of the local glaciers and ice caps on Greenland. *The Cryosphere*, 6, 1483-1495.
- RAUP, B. H., KÄÄB, A., KARGEL, J. S., BISHOP, M. P., HAMILTON, G., LEE, E., PAUL, F., RAU, F., SOLTESZ, D., KHALSA, S. J. S., BEEDLE, M. & C. HELM (2007): Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project. *Computers and Geosciences*, 33, 104-125.
- RICHARDSON, S. D. & J. M. REYNOLDS (2000): An overview of glacial hazards in the Himalaya. *Quaternary International*, 65/66, 31-47.
- VAUGHAN, D. G., J. C. COMISO & 12 others (2013): Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 317-382.
- WULDER, M. A., MASEK, J. G., COHEN, W. B., LOVELAND, T. R. & C. E. WOODCOCK (2012): Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2-10.
- ZEMP, M. & 35 others (2015): Historically unprecedented global glacier changes in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61 (228), 745-762.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Projekt *Glaciers_cci* ESA ermöglicht (4000109873/14/I-NB).

Kontakt:

Dr. Frank Paul

Department of Geography, University of Zurich
frank.paul@geo.uzh.ch

Paul, F. (2015): Kartierung von Gletschern mit Satellitendaten und das globale Gletscherinventar. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp.104-111. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.16