

# Volumenänderung der Gletscher in den Schweizer Alpen

Autor(en): **Bauder, Andreas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **113 (2015)**

Heft 9

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-513922>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Volumenänderung der Gletscher in den Schweizer Alpen

Die Entwicklung der Oberflächentopographie der Gletscher in den Schweizer Alpen ist dank den seit den 1960er Jahren in regelmässigen Abständen vorhandenen hoch aufgelösten Luftbildern gut dokumentiert. Daraus lassen sich Zeitserien der Volumenänderung ableiten. Diese geben nicht nur den beträchtlichen Volumenverlust wieder, welchen die Gletscher im letzten Jahrhundert erfahren haben, sondern zeigen auch unterschiedliche Teilperioden mit Volumengewinn und verstärktem Abbau der Eisreserven. Dabei ergaben sich grössere Unterschiede im Ausmass der einzelnen Gletscher.

*Le développement de la topographie de surface des glaciers dans les Alpes suisses est bien documenté grâce aux photos aériennes à haute résolution prises à intervalles réguliers depuis les années 1960. Il en résulte des séries temporelles des variations de volume. Celles-ci ne reflètent pas seulement la perte considérable de volume que les glaciers ont subie pendant le siècle passé mais démontrent également des périodes temporelles différentes avec des gains de volume et des décroissances accrues des réserves de glace. Ce faisant on a constaté d'assez grandes différences des divers glaciers.*

Lo sviluppo della topografia della superficie dei ghiacciai nelle Alpi svizzere è ben documentata e questo grazie alle riprese aeree ad alta risoluzione realizzate a intervalli regolari a partire dagli anni '60. Da queste riprese è possibile derivare le serie temporali del cambiamento di volume. Queste ultime restituiscono non solo l'ingente perdita di volume sopportata dai ghiacciai nei secoli scorso, ma documentano anche periodi parziali diversi, contrassegnati da un aumento di volume e un marcato smantellamento delle riserve di ghiaccio. Questo porta a differenze sostanziali nelle dimensioni dei singoli ghiacciai.

---

A. Bauder

---

Die Ausdehnung der Gletscher ist eine direkte Folge des herrschenden Klimas. So zählt die gut dokumentierte Schmelze der Gebirgsgletscher zu den deutlichsten Anzeichen des voranschreitenden Klimawandels. Die Veränderung der Gletscher spielt zudem auch bei der Wassernutzung, der Beurteilung von Naturgefahren und beim Tourismus eine Rolle. Obwohl die Alpengletscher für den globalen Meeresspiegelanstieg bedeutungslos sind, haben sie eine überregionale Bedeutung, da die Alpen als Wasserschloss Europas einen weitreichenden Einfluss haben.

Die Entwicklung der Gletscher ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Schneeakkumulation, des Abschmelzens und der Eisflussbewegung. Dabei stehen der Nachschub mit der Neubildung von Eis aus Schnee und der Abtrag durch das Schmelzen von Firn und Eis in direktem Zusammenhang mit den vorherrschenden Witterungsverhältnissen. Während die Schneeakkumulation, welche den Gletscher nährt, hauptsächlich vom Niederschlag abhängt, ist die dem Gletscher zugeführte Energie für die Schmelze entscheidend. Die Lufttemperatur ist ein guter Indikator dafür. Angetrieben durch die Schwerkraft fliesst das Eis als zähflüssige Masse von den höher in die tiefer

gelegenen Gebiete des Gletschers. Die Eisflussbewegung sorgt schliesslich dafür, dass sich Veränderungen in den Akkumulations- und Schmelzbedingungen je nach Grösse und Neigung des Gletschers unterschiedlich auswirken. Ein Gletscher reagiert auf eine Änderung im Nachschub dynamisch mit einem Gletschervorstoss oder Gletscherrückzug und passt seine Ausdehnung laufend an.

Diese Dynamik wurde bereits früh erkannt und wichtige systematische Beobachtungen eingeleitet. So wird seit dem Ende des 19. Jahrhunderts die Lage der Gletscherzunge jährlich eingemessen und daraus die Veränderung in der Längenausdehnung bestimmt. Von rund 100 Gletschern existieren inzwischen teilweise über hundertjährige lückenlose Messreihen. An einigen ausgewählten Gletschern wurde ab den 1910er Jahren sodann auch begonnen, die Veränderung der Eismasse durch Messungen von Schneezuwachs und Eisabtrag zu erfassen. Dies konnte jedoch nur für einige wenige meist kleinere Gletscher durchgeführt werden. Schliesslich dokumentieren die seit Mitte 20. Jahrhundert im Rahmen der Landesvermessung durch swisstopo sowie für Forschungsprojekte ausgeführten und regelmässig wiederholten Luftaufnahmen die räumliche Ausdehnung der Gletscher. Mittels stereophotogrammetrischen Analysen lässt sich damit die Volumenänderung einer grösseren Anzahl Gletscher bestimmen. Insbesondere trifft dies auch auf die grossen Gletscher in den Schweizer Alpen zu, auf welchen sich die aufwändigen detaillierten Messungen von Schneezuwachs und Eisabtrag nicht längerfristig aufrechterhalten lassen.

## Dicken- und Volumenänderungen

Durch den Vergleich von Geländemodellen für verschiedene Zeitpunkte kann die Dickenänderung bestimmt werden. Liegen neben den Geländehöhen auch noch die räumliche Ausdehnung des Gletschers zu den gleichen Zeitpunkten vor, kann weiter auch die Volumenänderung ermittelt werden.

Die dazu notwendige Information der Höhenmodelle und Gletscherumrisse wird durch stereophotogrammetrische Analysen von Luftbildern gewonnen. Um die Veränderung im Volumen auch weiter zurück als die ersten Luftaufnahmen erfassen zu können, wurde auf historische topographische Karten zurückgegriffen. Die vorhandenen Kontourlinien und Umrisse wurden digitalisiert und damit digitale Höhenmodelle erstellt. Sehr wichtig für glaziologische Anwendungen ist, dass der gesamte Gletscher innerhalb einer kurzen Zeitperiode komplett neu vermessen wurde und ein eindeutig zuordbares Aufnahmedatum existiert. Bauder et al. (2007) konnten zeigen, dass nicht nur spezielle Gletscherkarten (z.B. Rhonegletscher, Mattmarkgebiet) sondern auch die erste Ausgabe der Landeskarte 1:50000 sowie teilweise Aufnahmen der Siegfriedkarten (Topographischer Atlas) den Anforderung genügten und sinnvolle Resultate lieferten. Die vorhandene Datengrundlage an speziellen Geländemodellen dokumentiert die Volumenänderung über die letzten 100 Jahre von rund 62 Schweizer Gletschern (siehe Abb.1). Obwohl anzahlmässig ein kleiner Anteil, bedecken diese Gletscher mit aktuell 568 km<sup>2</sup> rund 60 % der vergletscherten Fläche in den Schweizer Alpen (Fischer et

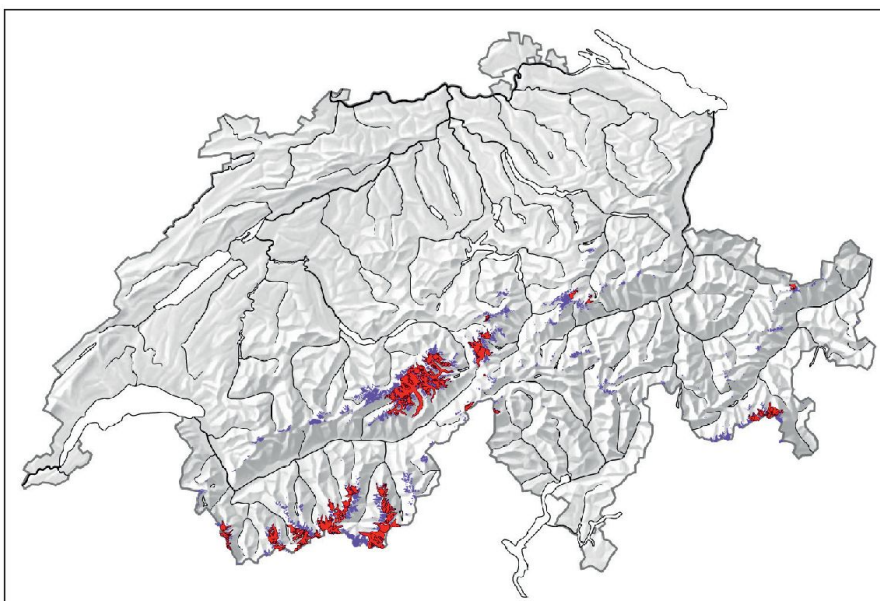


Abb. 1: Aktuelle Vergletscherung in den Schweizer Alpen (blau) und die 62 Gletscher (rot), für welche die Volumenänderung analysiert wurde.

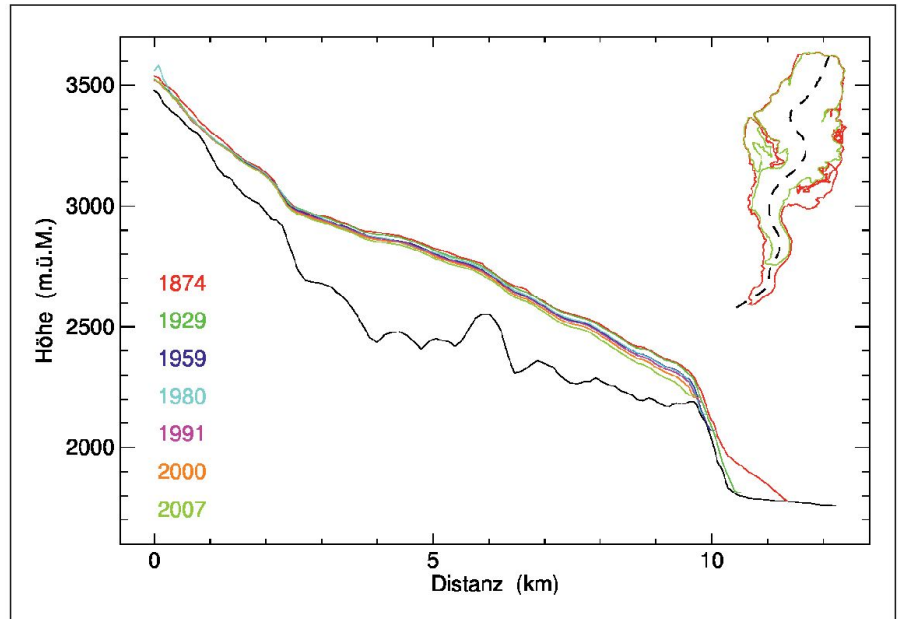


Abb. 2: Zentrales Längsprofil des Rhonegletschers mit verschiedenen Oberflächen zwischen 1874 und 2007 sowie des Untergrundes. Rechts oben ist die Lage des Längsprofils mit den Gletscherausdehnungen von 1874 und 2007 dargestellt.

al., 2014). Für viele dieser Gletscher gewährleiten bis zu zehn Geländemodelle eine sehr hohe zeitliche Auflösung. Abbildung 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der Gletscheroberfläche des Rhonegletschers entlang von einem zentralen Längsprofil zwischen 1874 und 2007. Sehr deutlich ist der Schwund nicht nur

in der Länge, sondern vielmehr auch in der Dicke zu beobachten. Zwischen 1959 und 1980 kam es zu einer Zunahme in der Dicke. Sie war jedoch zu wenig andauernd, als dass der Gletscher mit einem zwischenzeitlichen Vorstoss in der Länge darauf hätte reagieren können. Die Dickenänderung erstreckt sich dabei über die gesamte Gletscherfläche (Abb. 3). Es zeigt sich ein charakteristisches Muster mit den grössten Veränderungen an der Gletscherzunge, die hin zu den höchstgelegenen Regionen graduell abnehmen. In den einzelnen Teilperioden ist dieses abhängig vom Grad der Veränderung unterschiedlich ausgeprägt. Abbildung 3 zeigt diese Unterschiede für drei ausgewählte Perioden am Beispiel des Rhonegletschers auf. Während in der Periode 1959–1980 mit einer Volumenzunahme nur ein geringer Gradient zwischen tieferen und höheren Regionen vorhanden ist, gibt es einen sehr ausgeprägten Gradienten in den beiden Perioden 1991–2000 und 2000–2007 mit Volumenverlusten. Dennoch unterscheiden sich auch die letzten beiden Perioden. Über die Periode 1991–2000 hat die Dicke im Mittel um knapp einen halben

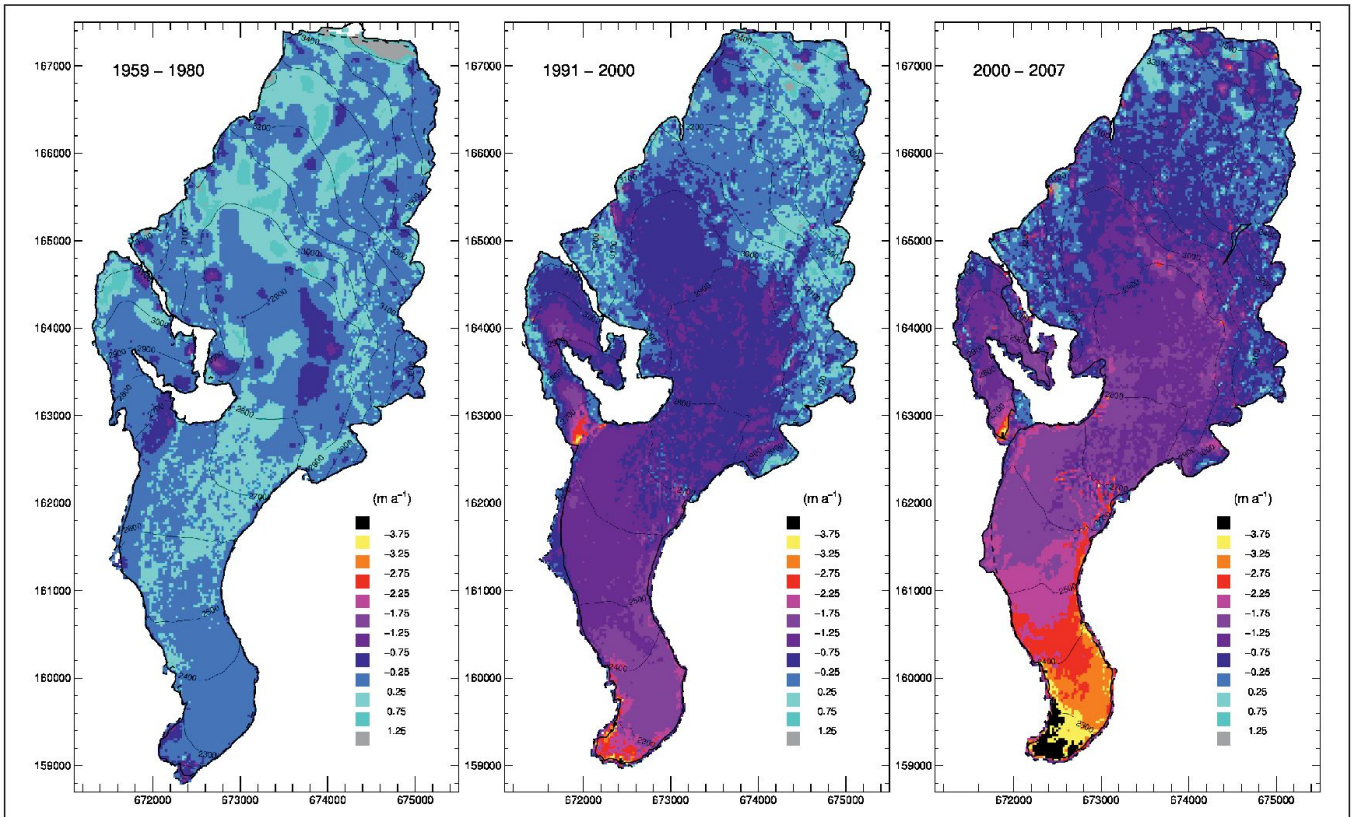


Abb. 3: Räumliche Verteilung der Dickenänderung auf dem Rhonegletscher für die drei Teilperioden 1959–1981, 1991–2000 und 2000–2007.

Meter pro Jahr abgenommen. In den höheren Regionen sind Bereiche mit ausgeglichener oder leichter Zunahme vorhanden. Demgegenüber war die mittlere Schwundrate 2000–2007 mit einem Meter pro Jahr doppelt so gross, die Verluste erstrecken sich über die gesamte Fläche und an der Zunge waren die Raten grösser als 4 m pro Jahr.

Für die Bestimmung der Volumenänderung des Rhonegletschers stehen sieben Geländemodelle von 1874 bis 2007 zur Verfügung. Die ersten beiden Zeitstände stammen von digitalisierten Karten – Die ersten Kartierungen entstanden im Rahmen der Rhonegletschervermessung 1874–1915 (Mercanton, 1916), einem gemeinsamen Forschungsprojekt der damaligen Schweizerischen Landestopographie und der Gletscher-Kommission. Der zweite Zeitstand ist die erste Ausgabe der Landeskarte 1:50 000, welche im Gebiet des Rhonegletschers 1929 aufgenommen wurde (Mercanton, 1958). Die späteren Geländemodelle ab 1959 sind

alle mittels photogrammetrischer Auswertungen von Luftbildern entstanden. Über die vergangenen rund 130 Jahre hat der Rhonegletscher ein Volumen von 645 Mio. Kubikmeter eingebüsst (Abb. 4). In fünf der sechs Teilperioden kam es dabei zu einem Volumenverlust. Nur in den 1960er und 1970er Jahre hat das Volumen zwischenzeitlich um 60 Mio. Kubikmeter zugenommen. Der ermittelte Volumenverlust insgesamt entspricht rund 30% des Volumens des Gletschers von 2.11 Kubikkilometern ( $\text{km}^3$ ) im Jahr 2007 (Farinotti et al., 2009).

Die erfasste Volumenänderung der 62 untersuchten Gletscher beginnt mit der Erstausgabe der Landeskarte 1:50'000, deren Aufnahme sich bei diesen Gletschern zwischen 1923 und 1939 erstreckte, und endet mit den letzten Aufnahmen zwischen 2000 und 2013. Bei zwei kleinen Gletschern ist der erste erfasste Zeitstand erst ab den ersten Luftbildern in den 1960er Jahren vorhanden. Die Gletscher haben zusammen insgesamt

23.17 Kubikkilometer ( $\text{km}^3$ ) eingebüsst. Dabei hat die Fläche um 20 % von 713  $\text{km}^2$  auf 568  $\text{km}^2$  abgenommen. Alle Gletscher verlieren an Volumen, jedoch variiert das Ausmass zwischen den verschiedenen Gletschern beträchtlich. Die absoluten Volumenwerte sind dafür wenig aussagekräftig, da sie sehr von der Gletschergrösse abhängen. Viel geeigneter dazu ist jedoch die Volumenänderung pro Fläche und Zeit, also die Rate der mittleren Dickenänderungen. So schwanken diese zwischen  $-0.1$  m pro Jahr und  $-0.8$  m pro Jahr beträchtlich. Je nach zeitlicher Auflösung der einzelnen Reihen sind Teilperioden mit einer Volumenzunahme zwischen Mitte 1950er und Mitte 1980er Jahre sowie verstärkten Volumenverlusten in den 1940er und seit Mitte 1980er Jahre sichtbar. Gut die Hälfte des Volumenverlusts mit 11.75 Kubikkilometern ( $\text{km}^3$ ) entstand über die letzten drei Dekaden, als die Gletscher einhergehend mit der Zunahme der Lufttemperaturen erhöhte Schmelzraten aufwiesen.

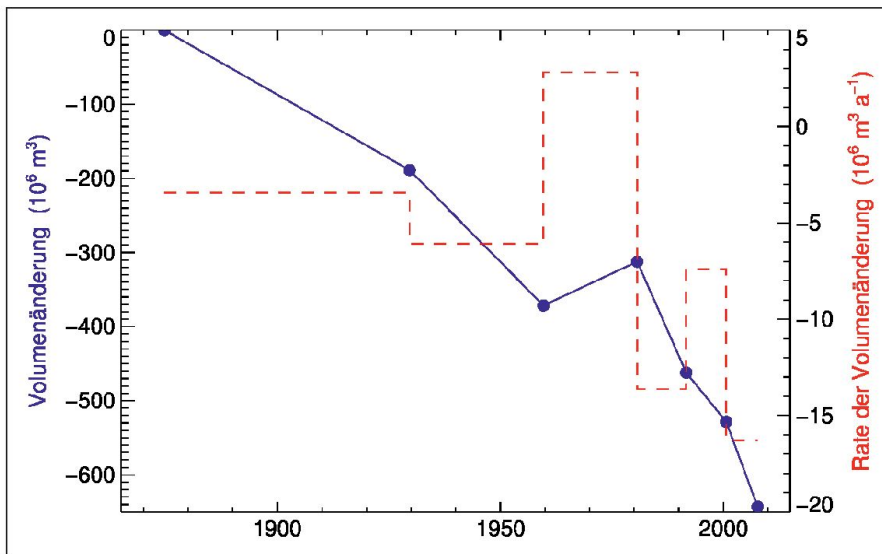


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Volumenänderung des Rhonegletschers von 1874 bis 2007.

Die Raten der mittleren Dickenänderung betragen zwischen  $-0.3 \text{ m}$  und  $-1.3 \text{ m}$  pro Jahr. Gleichzeitig ergab sich ein Verlust an Fläche von  $13 \%$ .

## Folgerungen

Im vorhandenen Datensatz sind die meisten der grossen Gletscher vertreten, insbesondere im Berner Oberland und Wallis, die Regionen in der Schweiz mit den grössten Eismassen und der ausgedehntesten Vergletscherung. Sie gewährleisten einen repräsentativen Überblick. Wie die Resultate der verschiedenen Gletscher zeigen, ist die Streuung gross. Insgesamt ist der Volumenverlust über die vergangenen rund hundert Jahre jedoch beträchtlich, wobei über kürzere Teilperioden von einer bis zwei Dekaden zwischenzeitlich Volumengewinne resultierten. Die dabei abgeschmolzenen Eisreserven stellen denn auch einen willkommenen Zusatzertrag für die Wasserkraft dar, welche viele ihrer Anlagen in stark vergletscherten Einzugsgebieten betreibt.

Die erarbeitete Datengrundlage stellt auch einen wichtigen Beitrag für die Bestrebungen des Schweizerischen Glet-

schermonitorings dar. Zudem ermöglichen solche langjährige Zeitreihen der Volumenänderung, die Massenbilanz in saisonaler Auflösung zu rekonstruieren (Huss et al., 2008) und somit zusätzliche Erkenntnisse zur Schneeakkumulation über den Winter und Schmelze im Sommer zu gewinnen.

Die ermittelten Raten der mittleren Dickenänderung korrespondieren gut mit der Analyse von Fischer et al. (2015), welche die beiden swisstopo Produkte DHM25 Level 1 und swissALTI3D für alle vorhandenen Gletscher verglich. Diese beiden Geländemodelle geben einen ersten Gletscherstand der 1960er bis 1980er Jahre (DHM25) und einen zweiten von 2008 bis 2011 (swissALTI3D) wieder. Obwohl sie besonders beim DHM25 keine konsistente Gesamtaufnahme des jeweiligen Einzelgletschers zu einem Zeitpunkt darstellen, ergeben sich über diese längere Vergleichsperiode trotzdem wichtige Zahlenwerte der totalen Volumenänderung. Die Studie hat für die etwa 35-jährige Periode einen schweizweiten Eisvolumenverlust von  $-22.5 \text{ km}^3$  mit einer mittleren Dickenänderung von  $0.6 \text{ m}$  pro Jahr ermittelt.

### Referenzen:

- Bauder A., Funk M. und Huss M. (2007). Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology* 46, 145-149, doi:10.3189/172756407782871701.
- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A. and Funk, M. (2009). An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 68(3), 225-231, doi:10.1016/j.gloplacha.2009.05.004.
- Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. and Hoelzle, M. (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, doi:10.1657/1938-4246-46.4.933.
- Fischer, M., Huss, M. and Hoelzle, M. (2015). Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980–2010. *The Cryosphere*, 9, 525-540, doi:10.5194/tc-9-525-2015.
- Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Hock, R. (2008). Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *Journal of Geophysical Research*, 113(F1), F01015, doi:10.1029/2007JF000803.
- Mercanton, P.L., (1916). Vermessungen am Rhonegletscher / Mensuration au glacier du Rhône: 1874–1915. *Neue Denkschr. Schweiz. Naturforsch. Ges.*, 52.
- Mercanton, P.L., (1958). Aires englacées et cotes frontales des glaciers suisses. *Wasser- und Energiewirtschaft* 50(12), 347-351.

Andreas Bauder  
 Versuchsanstalt für Wasserbau,  
 Hydrologie und Glaziologie (VAW)  
 ETH Zürich  
 Höggerbergring 26  
 CH-8093 Zürich  
 bauder@vaw.baug.ethz.ch