

Das Schweizerische Gletscherinventar als Produkt des swissTLM^{3D}

Gletscherinventare beschreiben die vollständige Ausdehnung aller Gletscher zu einem bestimmten Zeitpunkt und bilden einen zentralen Datensatz für viele Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften. Bedingt durch den grossen Aufwand für die Erstellung eines Inventares existierten bis anhin nur drei komplette und GIS-taugliche Gletscherinventare für das Gebiet der Schweiz (1850, 1973 und 2010). Im Rahmen des Aufbaus des Topografischen Landschaftsmodells (swissTLM^{3D}) erfasst das Bundesamt für Landestopografie swisstopo unter anderem auch Gletscher als Objekte. Das Gletschermonitoring Schweiz (GLAMOS, www.glamos.ch) konnte die Anforderungen definieren, die es erlauben, ein Gletscherinventar als Produkt von swissTLM^{3D} zu erstellen. Diese Anforderungen hat swisstopo in das topografische Landschaftsmodell implementiert. Somit können die Gletscherinventare der Schweiz in Zukunft und langfristig gesichert aus swissTLM^{3D} abgeleitet werden.

Les inventaires des glaciers décrivent de manière exhaustive l'étendue de tous les glaciers en un point temporel déterminé. Ils constituent un éventail de données central contribuant à de multiples disciplines des sciences naturelles et de sciences de l'ingénieur. En raison de l'investissement conséquent requis pour l'établissement d'un inventaire, il n'existait à ce jour que trois inventaires des glaciers du territoire suisse (1850, 1973 et 2010). L'Office fédéral de la topographie swisstopo répertorie et saisit la géométrie des glaciers dans le cadre de la mise en place du modèle topographique du paysage (swissTLM^{3D}). Le Réseau suisse des observations glaciaires (GLAMOS, www.glamos.ch) a pu définir les exigences permettant d'élaborer un inventaire des glaciers comme produit de swissTLM^{3D}. Swisstopo a implémenté ces exigences dans le modèle topographique du paysage. Ainsi, la tenue des inventaires des glaciers de la Suisse pourra dorénavant être assurée durablement et les données être dérivées de swissTLM^{3D}.

Gli inventari dei ghiacciai descrivono la loro estensione completa in un determinato periodo di tempo e costituiscono un set di dati fondamentale per tante discipline nelle scienze naturali e ingegneristiche. A causa della grande mole di lavoro necessaria per l'allestimento di un inventario, finora esistono solo tre inventari completi e conformi a GIS per la regione della Svizzera (1850, 1973 e 2010). Nell'ambito dell'allestimento del Modello topografico del paesaggio (swissTLM^{3D}), l'Ufficio federale di topografia swisstopo rileva, tra l'altro, anche i ghiacciai come oggetti. La rete di monitoraggio dei ghiacciai svizzera GLAMOS (www.glamos.ch) potrebbe definire i requisiti che consentirebbero di allestire un inventario dei ghiacciai come prodotto di swissTLM^{3D}. Tali requisiti sono stati implementati da swisstopo nel Modello topografico del paesaggio. In tal modo, in futuro gli inventari dei ghiacciai della Svizzera potranno essere derivati anche nel lungo periodo da swissTLM^{3D}.

Y. Weidmann, H. Bärtschi, S. Zingg,
E. Schmassmann

Hintergrund und Motivation

Im Rahmen des Gletschermonitoring Schweiz (GLAMOS) erheben die drei Hochschulen ETH Zürich, Universität Zürich und Universität Fribourg in Zusammenarbeit mit einem Netzwerk von kantonalen Stellen und privaten Beobachtern die Längenänderungen, Massenbilanzen, Eisvolumenveränderungen, Fließgeschwindigkeiten, Eistemperaturen und weitere Parameter von Schweizer Gletschern. Diese Daten stehen zum einen der Wissenschaft zur Verfügung, werden aber über das Webportal von GLAMOS (www.glamos.ch) auch der breiten Öffentlichkeit angeboten.

Eine zentrale weitere Aufgabe von GLAMOS ist die Sammlung von Gletscherinventaren. Dabei umfasst ein Gletscherinventar die Kennwerte aller Gletscher des Inventargebiets zu einem bestimmten Zeitpunkt, respektive Zeitraum. Üblicherweise beschreiben die Kennwerte die Ausdehnung und somit die Grösse und den Höhenbereich des Gletschers, die Höhenlage der Grenze zwischen Nähr- (Akkumulation) und Zehrgebiet (Ablation) sowie die mittlere Neigung und Exposition.

Gletscherinventare bilden ein wichtiges Mittel bei der langfristigen Betrachtung der Gletscherflächen eines Gebietes, geben Auskunft über Prozesse im Hochgebirge und bilden die Grundlage für die Modellierung von Grössen wie dem hydrologischen Abfluss, dem Abschätzen von vorhandenem Eisvolumen und der zukünftigen Entwicklung der Gletscher. Gleichzeitig dienen Inventare neben der Klima- und Gletscherforschung der Planung von Infrastrukturbauten wie z. B. Wasserkraftwerken und Bauten für den Hochwasserschutz.

Trotz der langen Tradition der Glaziologie in der Schweiz liegen nur drei eigentliche Inventare der schweizerischen Gletscher vor (Abb. 1). Dabei bildet das Inventar von



Abb. 1: Gletscherinventare für die Jahre 1850 (rot), 1973 (grün) und 2010 (blau) im Gebiet des Unteraargletschers.

1973 [1] die Grundlage für alle weiteren Inventare der Gletscher innerhalb der Schweiz. Das Inventar von 1850 [3] beruht auf Rekonstruktionen des damaligen Gletscherhöchststandes. Das Inventar von 2010 [2] wurde im Rahmen einer Dissertation basierend auf dem Orthophotomosaik der Schweiz SWISSIMAGE von swisstopo erstellt.

Der Grund für die kleine Anzahl von umfassenden Gletscherinventaren liegt beim hohen Aufwand für die Erstellung solcher Werke. Weitere Gletscherinventare sind auch mit Mitteln der Satelliten-Fernerkundung erstellt worden [4]. Für grossräumi-

ge und entlegene Gebiete ist dies die einzige Möglichkeit, solche Inventare zu erstellen. Für die präzise Abgrenzung der Gletscherflächen in der Schweiz konnte dabei aber qualitativ nicht an das Inventar von 1973 angeknüpft werden.

Um trotzdem auch in Zukunft und mit einem vertretbaren zeitlichen und finanziellen Aufwand Gletscherinventare erstellen zu können, musste eine alternative Methode, respektive ein neuer Ansatz, gefunden werden. Die Rahmenbedingungen bei der Auswahl der Methode waren gegeben durch die engen finanziellen Grenzen, die Möglichkeit, nicht nur einen

Zeitstand, sondern laufende Zeitstände zu erheben und die Garantie der langfristigen Gletscherinventarisierung.

Mit swissTLM^{3D} hat swisstopo in den letzten Jahren ein topografisches Landschaftsmodell aufgebaut, welches die natürlichen und künstlichen landschaftsprägenden Objekte der Schweiz beschreibt. Die Objekte in swissTLM^{3D} sind messtechnisch erfasst und werden nicht kartografisch bearbeitet. Die Lagerichtigkeit der swissTLM^{3D}-Objekte ist dadurch gewährleistet. Im Datenmodell von swissTLM^{3D} sind die Perimeter der Gletscher als eigenständige Objekte vorhanden. Diese Ausgangslage erschien geradezu ideal, um die künftigen Gletscherinventare der Schweiz aus dem Produkt swissTLM^{3D} abzuleiten. In diesem Zusammenhang günstig sind auch die strengen Erfassungsrichtlinien, topologische Regeln, die grossmasstäbliche Erfassung in 3D und (gemäss Geoinformationsverordnung (GeoIV)) die langfristige Sicherstellung der Nachführung von swissTLM^{3D}.

Anforderungen von GLAMOS an das swissTLM^{3D}

Die in swissTLM^{3D} erfassten Geometrien für die Objekte der Klasse Gletscher konnten ursprünglich nicht direkt als Gletscherinventar verwendet werden. Um die

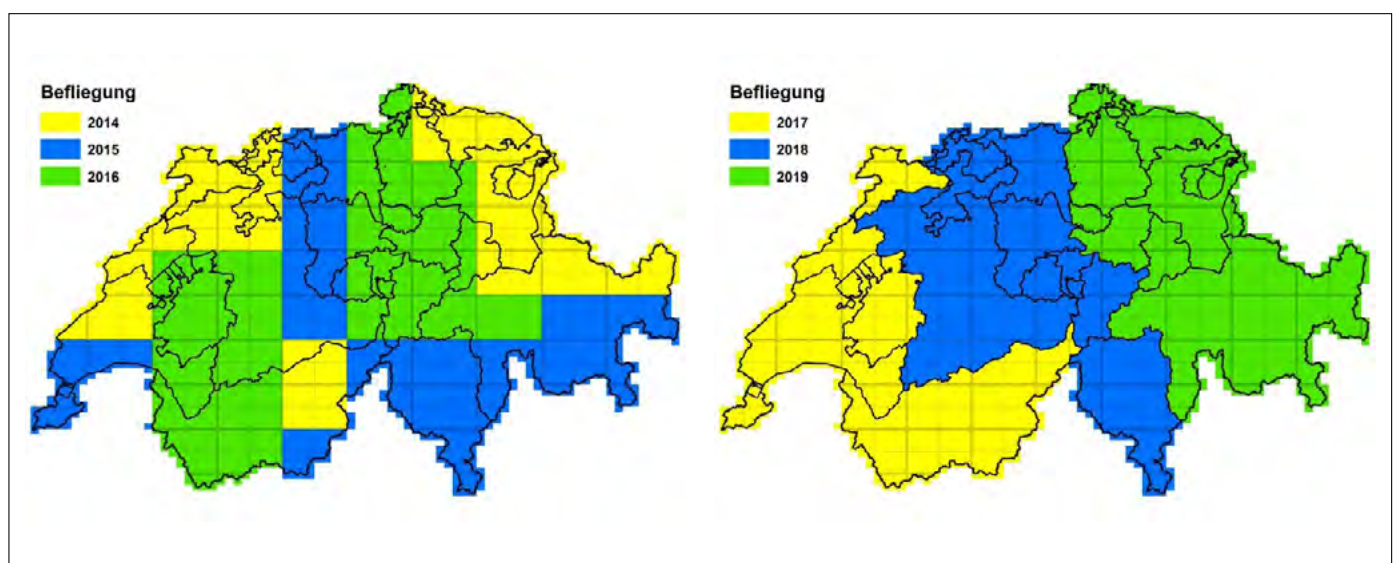


Abb. 2: Befliegungsblöcke der swisstopo bis 2016 (links) und ab 2017 (rechts). Bis 2016 war speziell das Gebiet der Aargletscher mit drei verschiedenen Befliegungsjahren sehr problematisch.

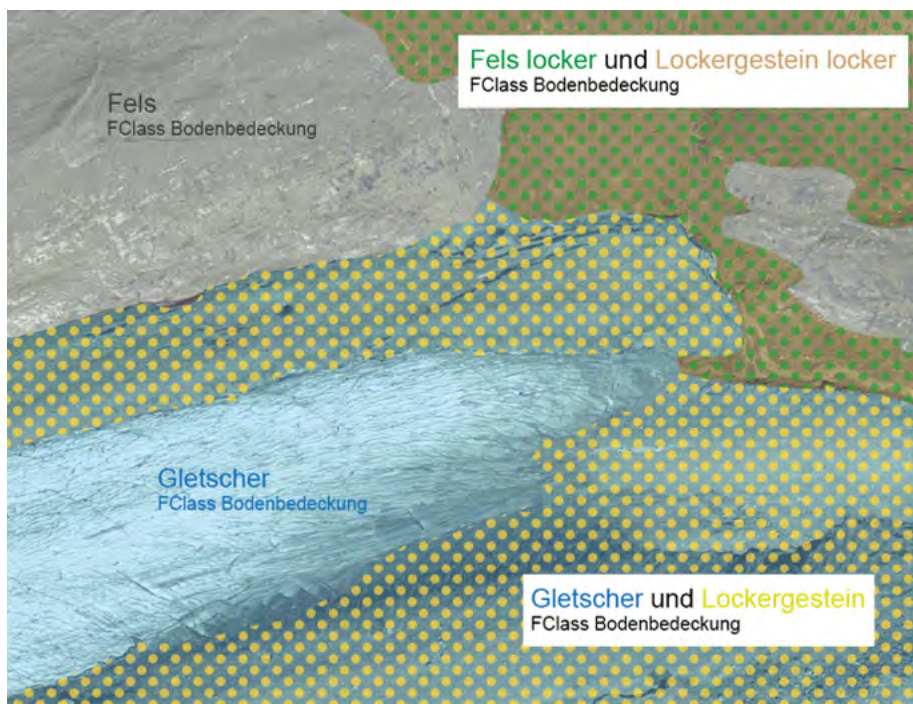


Abb. 3: Definition der verschiedenen Objekttypen der Bodenbedeckung in den Erfassungsrichtlinien des swissTLM^{3D}.

Geometrien der Gletscherflächen für ein Inventar nutzen zu können, müssen Aspekte wie die Abtrennung zwischen hydrologischen Einzugsgebieten, die periodische Nachführung, der Umgang mit sich auftrennenden Gletscherflächen und die Abgrenzung zwischen Gletscher sowie Schnee und Firn berücksichtigt sein.

Weiter war die bis 2016 geltende Blockaufteilung der Luftbildbefliegungen von swisstopo ein grosses Hindernis bezüglich der Nutzung der Bilddaten für die Glaziologie. Die Blöcke richteten sich ausschliesslich nach den Blattgrenzen der Landeskarte und nicht nach administrativen Grenzen oder naturgegebenen Faktoren wie z.B. Einzugsgebietsgrenzen. Um die Daten der Luftbildbefliegungen sinnvoll für die Glaziologie nutzen zu können, müssen zusammenhängende Gletscherflächen immer flächendeckend befliegen und bearbeitet werden können. Die 2017 erfolgte Umstellung des Flugplans von swisstopo auf kantonale Grenzen, und somit in den meisten Fällen auch auf hydrologische Einzugsgebiete, verbesserte die Ausgangslage für die erweiterte Nutzung der Daten für die Glaziologie essenziell.

Die Arbeitsgruppe Gletscher der Expertenkommission Kryosphäre (EKK) erstellte 2015 eine genaue Spezifikation der Erfassung, Abgrenzung und Attributierung von Gletscherflächen, welche bei swisstopo eingereicht wurde. Die Spezifikation um-

fasste neben den oben genannten Kriterien an das swissTLM^{3D} auch Anforderungen an das Produkt swissALTI^{3D}, das Höhenmodell von swisstopo [5].

Vorteile und Erwartungen an das Gletscherinventar aus dem swissTLM^{3D}

Ein aus dem swissTLM^{3D} abgeleitetes Inventar weist gegenüber bestehenden Inventaren, wie z.B. demjenigen von 2010, einige sehr gewichtige Vorteile auf: Die Einbettung der benötigten Arbeiten in ein grosses und langfristiges Projekt sichert den Fortbestand des Datensatzes über einen langfristigen Zeitraum. Gleichzeitig ist auch die technologische Migration, zum Beispiel zu neuen Datenformaten und Erfassungsmethoden, garantiert. Die Abhängigkeit von einzelnen Experten kann minimiert werden.

Die Berücksichtigung der Anforderungen für ein Gletscherinventar im Produkt swissTLM^{3D} bewirkt einen grossen Mehrwert für GLAMOS sowie die Glaziologie in der Schweiz und war für swisstopo mit geringem Mehraufwand umsetzbar. Die aufwendigste Arbeit umfasste die Aufteilung von Gletscherflächen des bestehen-



Abb. 4: Workshop zur Erfassung von Gletschergeometrien im swissTLM^{3D} bei der swisstopo.

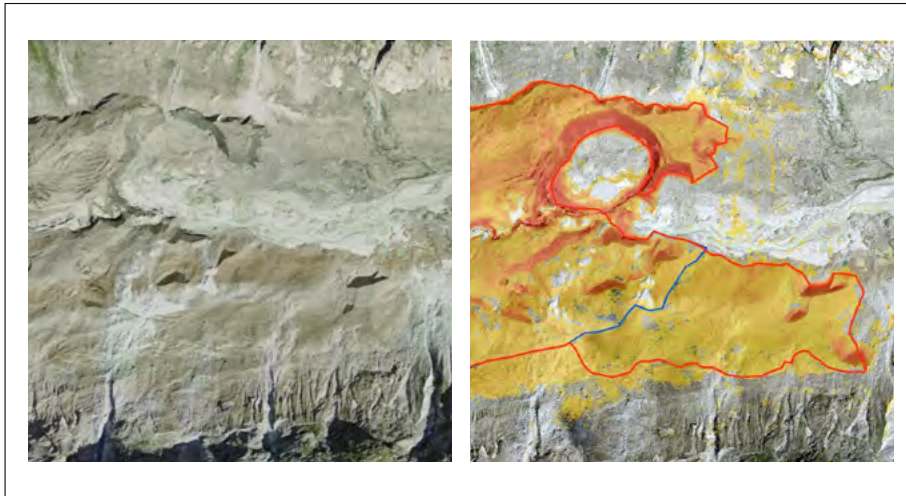


Abb. 5: Schuttbedeckte Gletscherzunge Unteraargletscher: Links Orthophoto mit schwierig abzugrenzender Eismasse. Rechts: Orthophoto mit Höhendifferenz aus swissALTI^{3D} und Interpretationsvarianten der Gletscherabgrenzungen (blaue und rote Linien).

den Datensatzes, welche sich über zwei oder mehr Einzugsgebiete erstreckten. Um einzelne Gletscher oder Gletscherflächen identifizieren zu können, wurde im Rahmen des Inventars von 1973 eine systematische Nummerierung als eindeutige Kennung jedes einzelnen Gletschers eingeführt [1]. Diese Systematik wurde beibehalten und in swissTLM^{3D} eingearbeitet. In einer separaten Tabelle werden diese Gletscherkennungen mit den eindeutigen Objekt-Identifikationen des swissTLM^{3D} verknüpft. Über diese Nummerierung aller Gletscherflächen können einzelne Gletscherflächen auf logischer Basis zwischen den unterschiedlichen Zeitständen der Inventare miteinander verglichen werden.

Im Rahmen der Implementierung der Anforderungen von GLAMOS an swissTLM^{3D} in den Jahren 2016 und 2017, wurden auch die Erfassungsrichtlinien von swisstopo angepasst. Dabei wurden den glaziologischen Anforderungen an die Erfassung von Gletscherflächen und der Abgrenzung zu Schnee und Firnflächen Rechnung getragen (Abb. 3).

2016 wurden die TLM-Operateure von swisstopo im Rahmen eines Workshops durch Vertreter von GLAMOS mit den glaziologischen Aspekten der Eisflächen vertraut gemacht und geschult (Abb. 4). Die Kombination von angepassten Erfas-

sungsrichtlinien und Schulung der Operateure garantiert eine gleichbleibende und schweizweit homogene Qualität bei der Erfassung von Gletschergeometrien. Speziell bei von Schutt überlagerten Gletscherzungen ist eine Abgrenzung zwischen Toteis, Gletscher und reinem Schutt optisch in 2D-Aufsicht kaum möglich (Abb. 5). Mit der stereometrischen 3D-Er-

fassung der swissTLM^{3D}-Objekte, auf Basis von Luftbilddaten aus verschiedenen Flugjahren, können solche Abgrenzungen deutlich besser vorgenommen werden als mit Orthofotos in 2D. Schuttbedeckte Gletscher bergen eine grosse Unsicherheit für eine exakte geometrische Abgrenzung – respektive eine solche Abgrenzung ist kaum möglich – und können so eine Gesamtaussage relevant beeinträchtigen. Durch die ebenfalls in swissTLM^{3D} erfasste Objektart Lockergestein steht aber neu eine Informationsquelle zur Verfügung, mit welcher solche unsicheren Abgrenzungen lokalisiert, analysiert und quantifiziert werden können.

Die Nachführung von swissTLM^{3D} im 6-Jahresrhythmus, basierend auf den Bilddaten der periodischen, flächendeckenden Befliegung der Schweiz, führt zu einem zukünftig stetig aktualisierten Inventar aller Gletscherumrisse. Über die Attribuierung der einzelnen Geometrien mit den jeweiligen Gletschernummern und dem Jahr des Bildflugs, welcher für die Aktualisierung verwendet wurde, entsteht nicht nur ein laufend aktualisiertes Inventar, sondern eine sehr wertvolle Zeitreihe mit der Ausdehnung der sich

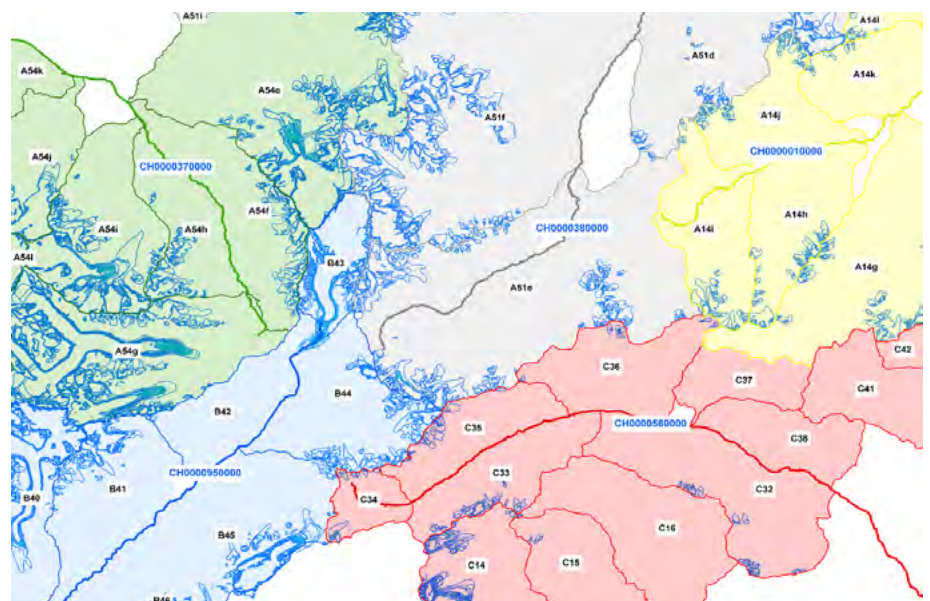


Abb. 6: Unterteilung der Inventargebiete in die Hauptabflussgebiete Aare (grün), Reuss (grau), Rhein (gelb), Ticino (rot) und Rhone (blau) sowie alle erfassten Gletschergeometrien von GLAMOS (blaue Linien) im Gebiet Furkappass/Andermatt. Die Hauptabflussgebiete sind in kleine Untereinheiten aufgeteilt (schwarze Codes).

verändernden Geometrien und Höhenlagen der Gletscher und der Abtrennung und Aufteilung von Neben- und Hauptgletscher.

Harmonisierung Gletscherinventare Schweiz

Die existierenden Gletscherinventare der Schweiz für die Jahre 1850, 1973 und 2010 und das zukünftige Inventar aus den Daten des swissTLM^{3D} basieren auf vier unterschiedlichen Erfassungsmodellen, -methoden und Vorgehen. Die Gletscherinventare sind deshalb untereinander nur schwer vergleichbar. Die Vergleichbarkeit scheiterte einerseits an der leicht unterschiedlichen Methodik bei der Vergabe der Inventarnummern und andererseits an den unterschiedlichen Ansätzen wie zusammenhängende Gletscherflächen in Einzelgletscher zu unterteilen sind.

Im Rahmen des Aufbaus der GLAMOS-Datenbank wurde ein grosser Aufwand in die Harmonisierung der drei ursprünglichen Inventare investiert. Dabei galt es, die Nummerierung und die Abtrennung der Gletscherflächen untereinander abzugleichen. Ziel dieser Harmonisierung war eine in sich stimmige Zeitreihe von Gletschergeometrien und die Herleitung der hierarchischen Ordnung von sich im Laufe der Zeit trennenden Gletscherflächen.

Verknüpfung von Gletscher und Gewässernetz aus swissTLM^{3D}

Im Rahmen des Gletscherinventars 1973 wurde ein Nummerierungssystem für die einzelnen Gletscher eingeführt, welches auf hydrologischen Einzugsgebieten basiert. Die Haupteinzugsgebiete der Schweiz werden nach den aus der Schweiz abfliessenden Hauptgewässern gegliedert (Rhein, Rhone, Inn, Ticino), in einer zweiten Stufe auf wichtige Flussgebiete aufgeteilt (zum Beispiel Aare, Reuss, Limmat, ...) und in zwei weiteren hierarchischen Stufen auf einzelne Gletschergebiete aufgeteilt (zum Beispiel Göschenreuss, Saaser Vispa). Innerhalb eines

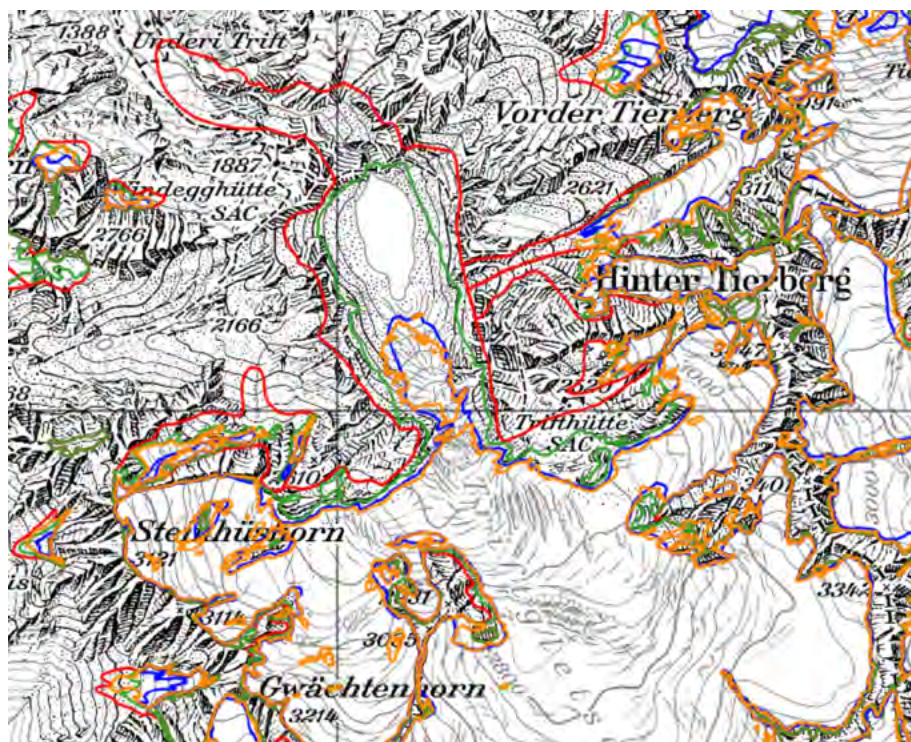


Abb. 7: Erste Version des Gletscherinventares aus dem Release 2018 des swissTLM^{3D} (orange) im Vergleich zu den Inventaren 1850 (rot), 1973 (grün) und 2010 (blau).

solchen Gletschergebietes werden die einzelnen Gletscher durchnummeriert (Abb. 6).

Dieses Nummerierungssystem erlaubt es zwar grundsätzlich, jeden Gletscher einem Oberflächengewässer zuzuordnen. Ausser für das Gletscherinventar wird es aber leider für keine andere Anwendung verwendet. Eine Verknüpfung des Gletschers mit dem hydrologischen System der Schweiz kann deshalb nur über die geografische Lage und einen räumlichen Verschnitt mit den hydrologischen Einzugsgebieten erreicht werden. Dieser Prozess ist aufwendig und fehleranfällig. Im Gegensatz dazu unterhält die swisstopo im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) die Nachführung und den Unterhalt des Gewässernetzes der Schweiz. Ursprünglich im Datensatz VECTOR25 geführt, wird heute auch dieses Gewässernetz innerhalb des swissTLM^{3D} aufgebaut und steht ab anfangs 2020 flächendeckend zur Verfügung. Als zentrales Attribut des Gewässernetzes wird die Gewässerlaufnummer (GWLNR) geführt. Die GWLNR erlaubt es, die ab-

schnittsbasierten Geometrien (von Gewässermündung bis Gewässermündung) der Gewässer in einem separaten Schritt in ein geroutetes und kilometriertes Gewässernetz abzuleiten.

Um mit Netzwerkanalysen auf dem Gewässernetz auch die in den Quellgebieten liegenden Gletscher zu berücksichtigen, ist die GWLNR als weiterer Schlüssel in die GLAMOS-Datenbank integriert worden. Diese Integration verknüpft die Gletscher attributiv mit dem Gewässernetz der Schweiz. Solche Analysen, in Kombination mit mehreren Zeitständen des Gletscherinventars, erlauben zum Beispiel eine schnelle Quantifizierung der Veränderung der Gletscherflächen eines einzelnen Einzugsgebietes oder eines ganzen Flusssystemes.

Zusammenfassung und Ausblick

Seit dem Release 2018 des Produkts swissTLM^{3D} steht eine erste Version des Gletscherinventares der Schweiz, basierend auf dem topografischen Land-

schaftsmodell von swisstopo zu Verfügung (Abb. 7). Mit diesem Release konnten bereits erfolgreich erste wertvolle Arbeiten und Vergleiche durchgeführt werden. Mit dem neuen Datensatz verfügt die Schweiz nun über das weltweit erste Gletscherinventar, welches grossmasstäblich und in 3D erfasst und fortan stetig aktualisiert wird.

Neben der Aktualität der Daten überzeugt auch der Detaillierungsgrad der Erfassung, die Homogenität und die Vollständigkeit des Inventars. Vergleiche mit den bestehenden Gletscherinventaren zeigen einen grossen Gewinn beim Detaillierungsgrad der erfassten Geometrien und der Stimmigkeit zu den synchron erstellten Höhenmodellen. Aber dieser Gewinn beim Detaillierungsgrad stellt neue und zum Teil noch nicht gelöste Fragen beim Vergleich mit den bereits existierenden Inventaren. Die unterschiedlichen Erfassungsmethoden und

-masstäbe müssen bei solchen Vergleichen mitberücksichtigt werden.

In Kombination mit dem seit 2018 existierenden swissALTI^{3D}-Metadatenlayer und dem swissALTI^{3D} [5] existieren drei gegeneinander abgestimmte Datensätze, welche für die weiteren glaziologischen Arbeiten in der Schweiz eine wichtige und wertvolle Basis bilden.

Literatur:

[1] F. Müller, Firn und Eis der Schweizer Alpen: Gletscherinventar, vol. 57–57a. Zürich: ETH, Geographisches Institut, 1976.

[2] Fischer, M., Huss, M., Barboux, C., & Holzle, 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.

[3] M. Maisch and K. und N. in der S. Nationales Forschungsprogramm 31, Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand

1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien, 2. Aufl. Zürich: vdf, Hochschulverlag an der ETH, 2000.

[4] F. Paul, «The New Swiss Glacier Inventory 2000 Application of Remote Sensing and GIS,» 2003.

[5] Y. Weidmann, F. Gandor, and R. Artuso, «Temporale Metadaten Die Zeit als zusätzliche Dimension des Geo-Informationssysteme,» *Geomatik Schweiz*, vol. 10/2018, pp. 306–310, 2018.

Yvo Weidmann
VAW – ETH, Geoldee
Bellariastrasse 80
Postfach 1209
CH-8038 Zurich
yvo.weidmann@geoidee.ch

Hans Bärtschi
Stefan Zingg
Emanuel Schmassmann
swisstopo

HEXAGON
GEOSPATIAL

M.APP ENTERPRISE

AUS DATEN EINE ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGE SCHAFFEN

- ☁ Eine Plattform für jede **Cloud - Strategie**
- 📊 Echtzeit - **Datenvisualisierung** in 4D
- 🔍 Aus Daten **Informationen** gewinnen
- 💡 Fundierte **Entscheidungen** treffen

Unsere Fachleute geben gerne Auskunft:
info-switzerland@hexagon.com