

Dokumentation des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees für den Zeitraum 1982-2018 – eine Gletschergeschichte mit Ablaufdatum

VIKTOR KAUFMANN¹ & WOLFGANG SULZER²

Zusammenfassung: Gletscher dienen in der Hochgebirgsforschung als untrügliche Klimaindikatoren, da sie auf geänderte Umweltbedingungen relativ schnell mit Längen-, Flächen- und Volumenänderungen reagieren. 1982 wurde das Gössnitzkees (Schobergruppe, Hohe Tauern, Kärnten) erstmals in das Gletschermessnetz des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) eingebunden. Dies war gleichzeitig auch der Ausgangspunkt für weitere Detailuntersuchungen, welche insbesondere die Erweiterung des Methodenspektrums der geometrischen Gletscherbeobachtung zum Ziel hatten. In diesem Beitrag werden nicht nur die im Laufe der Zeit eingesetzten Messmethoden dargestellt, sondern auch deren Ergebnisse aus glaziologischer Sicht vergleichend präsentiert. Seit 1850, dem neuzeitlichen Gletscherhochstand, hat sich das Gössnitzkees ohne nennenswerte Unterbrechungen kontinuierlich in seiner flächenmäßigen Ausdehnung verkleinert. Aus derzeitiger Sicht ist davon auszugehen, dass das Gössnitzkees in den kommenden Jahren fast völlig abschmelzen wird, wiewohl seine Schuttbedeckung den Abschmelzprozess noch etwas verlangsamen wird können. Das 2018 mit einer UAV-gestützten Luftbildbefliegung festgestellte Einsinken/Abrutschen des Eiskörpers im zentralen Teil des Gletschers lässt vermuten, dass der Gletscher in seinem Endstadium in mehrere Lappen (Toteiskörper) zerfallen wird.

1 Einleitung

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts ist ein Ansteigen der mittleren jährlichen Lufttemperatur im Alpenraum von rund 2°C zu beobachten (ZAMG 2018). Diese geänderten Klimaverhältnisse führen nicht nur zum Abschmelzen der Gletscher, sondern sind auch verantwortlich für das Tauen des Permafrosts, das höhenzonale Verschieben von Vegetationsgrenzen und das Einwandern von wärmeliebenden Tieren in höhere Regionen. Die Gletscheränderungen (Länge, Fläche, Volumen/Masse) spiegeln im hohen Maße das regionale Klima wider und sind daher aus klimatologischer Sicht besonders interessant. Aus diesem Grunde werden Gletscher im Speziellen schon seit über 150 Jahren beobachtet und auch vermessen (MAYER 2010).

Das Gössnitzkees ist mit 49.83 ha (Stand 2009, FISCHER et al. 2015b) der größte Gletscher in der Schobergruppe, Hohe Tauern, Zentralalpen, Österreich und befindet sich in der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern, Kärnten (Abb. 1). Der Gletscher ist ein typischer Kargletscher und wird hauptsächlich von Lawinen aus den umgebenden Couloirs ernährt. Ein größeres Nährgebiet für Schnee und Eis fehlt. Charakteristisch für den Gletscher und auch für die gesamte Schober-

¹ Technische Universität Graz, Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie, Steyrergasse 30, A-8010 Graz, E-Mail: viktor.kaufmann@tugraz.at

² Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Arbeitsgruppe für Geospatial Technologies, Heinrichstraße 36, A-8010 Graz, E-Mail: wolfgang.sulzer@uni-graz.at

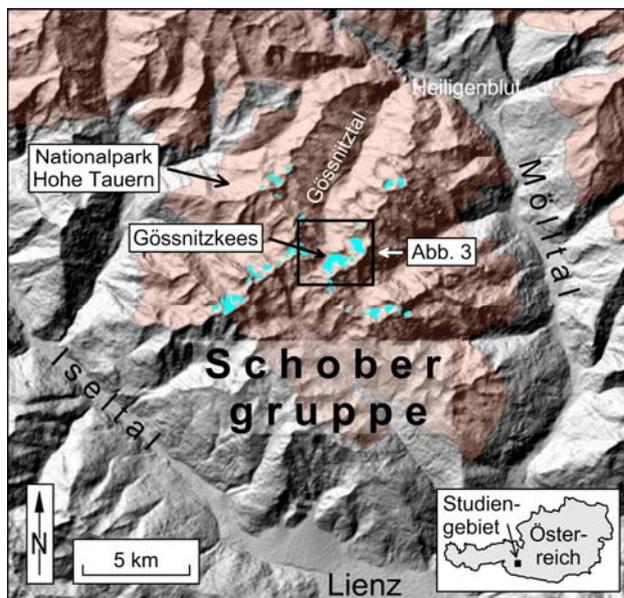


Abb. 1: Lage des Gössnitzkeeses

gruppe ist die starke Schuttbedeckung (LANG & LIEB 1993). Abbildung 2 zeigt den zentralen Bereich des Gletschers zu unterschiedlichen Epochen (1863, 1982 und 2018).

1982 haben Gerhard K. Lieb und Viktor Kaufmann am Gössnitzkees im Rahmen des Gletschermessdienstes des ÖAV (FISCHER et al. 2018) mit einfachen Gletscherrückgangsmessungen begonnen, um die Veränderung des Gletschers zu dokumentieren. Diese Messungen wurden vermessungs-technisch zwischenzeitlich (1989-2002) durch Wolfgang Sulzer durchgeführt. Derzeit liegt die Verantwortung bei Michael Krobath (LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2018). Unabhängig davon liefen bzw. laufen

noch weiterführende Detailstudien im universitären Bereich mit dem Fokus auf geometrisches Gletschermonitoring, um mit einer höheren raumzeitlichen Auflösung den offensichtlichen Gletscherrückgang zu erfassen. Schwerpunktmäßig werden nun in diesem Beitrag nicht nur die Forschungsergebnisse der letzten Jahre, sondern auch besonders aktuelle aus dem Jahre 2018 präsentiert.



Abb. 2: Photographische Aufnahmen des Gössnitzkeeses. Links: 1863, Photo Gustav Jägermayer, Reproduktion © Albertina, Wien, <https://www.albertina.at/>; Mitte: 15.9.1982, Photo V. Kaufmann; rechts: 18.8.2018, Photo V. Kaufmann

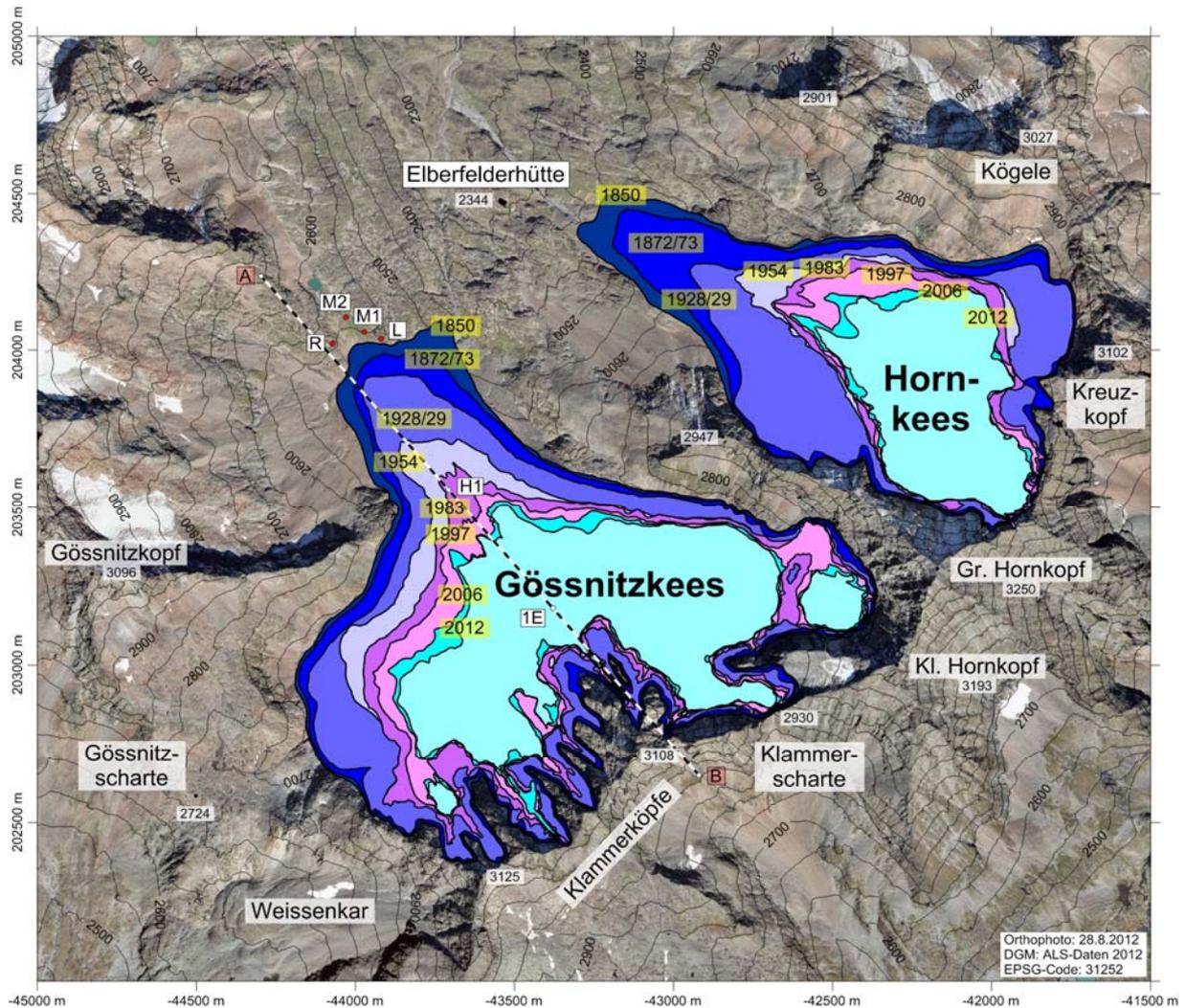


Abb. 3: Flächenänderung der Vergletscherung 1850-2012

2 Methoden

Das Methodenspektrum in der Gletschervermessung ist mannigfaltig (KÄÄB 2005). Am Beispiel des Gössnitzkeeses werden von den Autoren aus praktischen Gründen, wie z.B. Kosten, Machbarkeit und Genauigkeitsanforderungen, die im Folgenden angeführten fünf Methoden favorisiert und in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt. Andere Verfahren, wie z.B. terrestrisches Laserscanning (PAAR et al. 2012), optische Satellitenbildaufnahme (GANDER et al. 2003) oder satellitengestützte SAR-Interferometrie (KAUFMANN et al. 2009) wurden ebenfalls am Beispiel des Gössnitzkeeses untersucht, werden aber in diesem Beitrag bewusst ausgeblendet.

2.1 Geodätische Vermessung

Zwischen 1982 und 2002 wurde die Lage der Gletscherstirn alljährlich durch Trilateration (anfangs Maßbandmessungen, später Distometermessungen) in einem lokalen Koordinatensystem (Ausgangspunkte A82, B82; siehe Abb. 4) eingemessen. Durch den starken Gletscherrückgang

musste jedoch der Bezugsrahmen in Richtung des rückschreitenden Gletschertors nachgeführt werden. Der seit 1987/88 vorhandene Gletscherrandsee erschwerte die Vermessungsarbeiten erheblich. Hilfsdreiecke mussten alljährlich neu vermessen werden, um den Gletscherrand im Stirnbereich durch Einzelpunktmessung erfassen zu können. 1996 erfolgte die Erweiterung/Umstellung auf Tachymetrie mit einer Totalstation. Das lokale Festpunktfeld wurde laufend um weitere Punkte (A84, B84, A00, B00 und C00; siehe Abb. 4) ergänzt und gleichzeitig in das Koordinatensystem der Landesvermessung übergeführt. Die alljährliche Tachymetrie erfolgte durch Polarpunktaufnahme mit bekanntem Anschluss vom Standpunkt H1. Eingemessen wurden der Gletscherrand im Stirnbereich, zwei Gletscherrandprofile (Profile 1 und 2), acht Sonderpunkte (farbmarkierte Felsecken am Gletscher) und die Uferlinie des Gletscherrandsees (Abb. 4). Aus den Profilmessungen kann die höhenzonale Eisdickenänderung und über die Sonderpunkte die horizontale Fließgeschwindigkeit und ebenfalls auch die Eisdickenänderung abgeleitet werden. Seit 2014 erfolgt die alljährliche Vermessung mittels RTK-GNSS-Technologie/RTK-Vermessung (Real Time Kinematic). Als Referenzpunkt (Basispunkt) dient der Festpunkt B84.

2.2 Klassische Luftbildvermessung

Die flächenhafte Erfassung von Gletschern ist nur bildgestützt, vorzugsweise durch Luftbildvermessung, ökonomisch durchführbar. Auswerteergebnisse sind digitale Geländemodelle (DGM) und Gletscherflächen, welche in einem GIS nach glaziologischen Gesichtspunkten analysiert werden können. Die Zeitintervalle der Luftbildaufnahmen sind im Allgemeinen mehrjährig: Für den österreichischen Alpenbogen wurden bis jetzt insgesamt drei vollständige Gletscherinventuren (1969, 1989, 2006) durchgeführt (LAMBRECHT & KUHN 2007; FISCHER et al. 2015a). Bei der jüngsten Inventur wurden auch ALS-Daten unterstützend verwendet (ABERMANN et al. 2010). Die Gletscherinventare stehen als GIS-Datensätze für weiterführende Analysen zur Verfügung (FISCHER et al. 2015b).

Im Rahmen der eigenen Gletscherforschung in der Schobergruppe wurde in einem vom Nationalpark Hohe Tauern geförderten Projekt die Gletschergeschichte des Gössnitzkeeses und des benachbarten Hornkeeses für den Zeitraum 1850 (max. neuzeitliche Vergletscherung) bis 1997 erfasst. Die drei ältesten Gletscherstände wurden aus Geländebefunden (Seiten- und Endmoränen) und vorhandenem Kartenmaterial rekonstruiert (KAUFMANN & LIEB 2002). Exakte Luftbildauswertungen begannen mit der Epoche 1954 (KAUFMANN & PLÖSCH 2000). Die Datenerfassung erfolgte mit einem analytischen Plotter (DSR-1 von Kern). Im Zuge von weiteren Teilprojekten (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2008a) bzw. auch von studentischen Arbeiten (MODER 2008; KLINGHAN 2017) wurden weitere Epochen des Zeitraumes 2002-2012, nunmehr digital-photogrammetrisch (ImageStation von Z/I Imaging), ausgewertet. Bildmaterial aus dem Jahr 2015 ist noch nicht ausgewertet. Von allen genannten Epochen liegen in einem GIS georeferenzierte Gletscherflächen (-masken) und digitale Geländemodelle (2.5m-Raster) vor. Schwierigkeiten bei der Luftbildauswertung ergaben sich teilweise bei der Oberflächenerfassung überstrahlter, texturloser Flächen bzw. bei der Abgrenzung der Gletscherflächen im stark schuttbedeckten Bereich. Mit zunehmendem Gletscherrückgang und einhergehender vermehrter Schuttbedeckung ist die Oberflächenerfassung nicht mehr kritisch, wohingegen die Gletscherabgrenzung immer schwieriger wird. Für das Gössnitzkees wurde folgende Vorgangsweise gewählt: Bei fortwährendem Gletscherrückgang kann der Gletscherrand älterer Epochen durch Verschnitt des jeweili-

gen DGM mit einem zeitlich jüngeren Geländemodell rekonstruiert werden. Für die interaktive Korrektur der morphologisch unklaren Bereiche eignen sich besonders farbige Überlagerungen der Höhenschichtlinienbilder. Der Gletscherstand 2012 kann also erst mit der Auswertung 2015 gesichert dokumentiert werden (vgl. dazu Abschnitt 3.4). Eine weitere Methode den vorerst visuell nach morphologischen Gesichtspunkten erfassten Gletscherrand zu kontrollieren bzw. zu verbessern, besteht darin, die Fließgeschwindigkeit (Oberflächenbewegung) für die Abgrenzung der Gletscherfläche heranzuziehen. Für die Berechnung von 2D-Bewegungsvektoren wurde ein Matlab-Tool entwickelt, welches multi-temporale Orthophotos miteinander vergleicht. Der Algorithmus von Richard Ladstädter (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2004) funktioniert mit Stereorthophotos und ist in der Lage, aus sogenannten Quasi-Orthophotos nicht nur exakte 3D-Verschiebungsvektoren zu berechnen, sondern auch die multi-temporalen DGM zu verbessern. Im Rahmen der selbstständigen Arbeiten wurde nur Datenmaterial des Luftbildarchivs des BEV (analog, digital) verwendet. Für ausgewählte Epochen waren die photogrammetrischen Orientierungselemente bekannt. Das BEV ist bemüht, das Bundesgebiet Österreich in einem Zeitintervall von drei Jahren vollständig neu zu erfassen, was auch in den vergangenen Jahren zumindest für den Bereich des Gössnitzkeeses gelang. Für die dazwischen liegenden Jahre wird von den Autoren die Luftbildaufnahme mittels kostengünstiger UAV (Unmanned Aerial Vehicles) vorgeschlagen. Vielversprechende Pilotstudien wurden am nahegelegenen Tschadinhorn Blockgletscher, einem Kriechphänomen des diskontinuierlichen Hochgebirgspermafrosts (KAUFMANN et al. 2018), bzw. am Pasterzengletscher in der Glocknergruppe (SEIER et al. 2017) durchgeführt.

2.3 UAV-gestützte Luftbildvermessung

Im Sommer 2018 erfolgte im Rahmen der alljährlichen Gletschervermessung eine UAV-gestützte Luftbildaufnahme mit einer DJI Pantom 4 (DJI 2018). An notwendigen Genehmigungen für den diesbezüglichen Bildflug lagen (1) das Einverständnis der Grundeigentümer, (2) die behördliche Bewilligung durch die AustroControl und (3) die Ausnahmegenehmigung zur Durchführung eines Drohnenfluges in der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern vor. Die Bilddatengewinnung erfolgte über zwei Wegpunktflüge (nominelle Flughöhe über Grund: 100 m, Längs- und Querüberdeckung: 82% bzw. 63%). Das Aufnahmegebiet umfasst den zentralen Teil des Gletschers oberhalb der Gletscherstirn und den vorgelagerten Gletscherrandsee (Abb. 4). Zu jeder der 136 Flugaufnahmen wurden die GPS-Koordinaten aufgezeichnet. Für die genaue Georeferenzierung des Bildverbandes wurden vor der Befliegung elf große und für die Validierung acht weitere, kleinere Passpunktssignale gleichmäßig im Befliegungsgebiet ausgelegt und mittels RTK-GNSS eingemessen. Die Datenauswertung erfolgte mit der kommerziellen Software Agisoft PhotoScan (AGISOFT 2018). Die verwendete Kamera wurde mit den Parametern f , c_x , c_y , K_1 , K_2 , P_1 , P_2 , B_1 und B_2 im Zuge einer Simultankalibrierung modelliert. Mit Hilfe der kleinen Passpunktssignale und der teilweise luftsichtbaren sonstigen geodätischen Punkte wurde ein unabhängiger RMS-Fehler für die Genauigkeitsbewertung berechnet. Detailuntersuchungen bezogen sich u.a. auf die GPS-gestützte Bildtriangulation ohne bzw. mit nur einem Passpunkt (vgl. Tab. 1). Weiters wurde die Höhengenaugigkeit des ermittelten DGM entlang der Profillinie 1 durch Vergleich der interpolierten Höhenwerte mit den diesbezüglichen geodätischen Messungen bestimmt. Eine weitere Validierungsmöglichkeit ergab sich durch Differenzbildung des ermittelten DGM (nun im 1m-Raster) mit den ALS-basierten DGM aus 2012. Als Ergebnis der

Datenauswertung wurde ein DGM mit 10 cm Rasterweite und ein Orthophotomosaik mit 5 cm Bodenaufösung berechnet (vgl. Abb. 4). Weitere glaziologisch relevante Informationen, wie z.B. der sichtbare Gletscherrand, morphologische Strukturlinien (Abrisse) und die Uferlinie des Gletscherrandsees, wurden interaktiv im Orthophotomosaik bzw. im 3D-Modell erfasst.

Tab. 1: Genauigkeitsangaben zur Bildtriangulation

Passpunkte	RMS _X (m)	RMS _Y (m)	RMS _Z (m)	Rückprojektionsfehler (Pixel)
11	0.031	0.022	0.022	0.47
unabh. Kontrolle	0.030	0.022	0.036	0.40
keine	0.769	1.142	0.456	0.44
1 (Pkt. 101)	0.773	1.100	0.666	0.44
2 (101, 111)	0.188	0.141	0.500	0.44

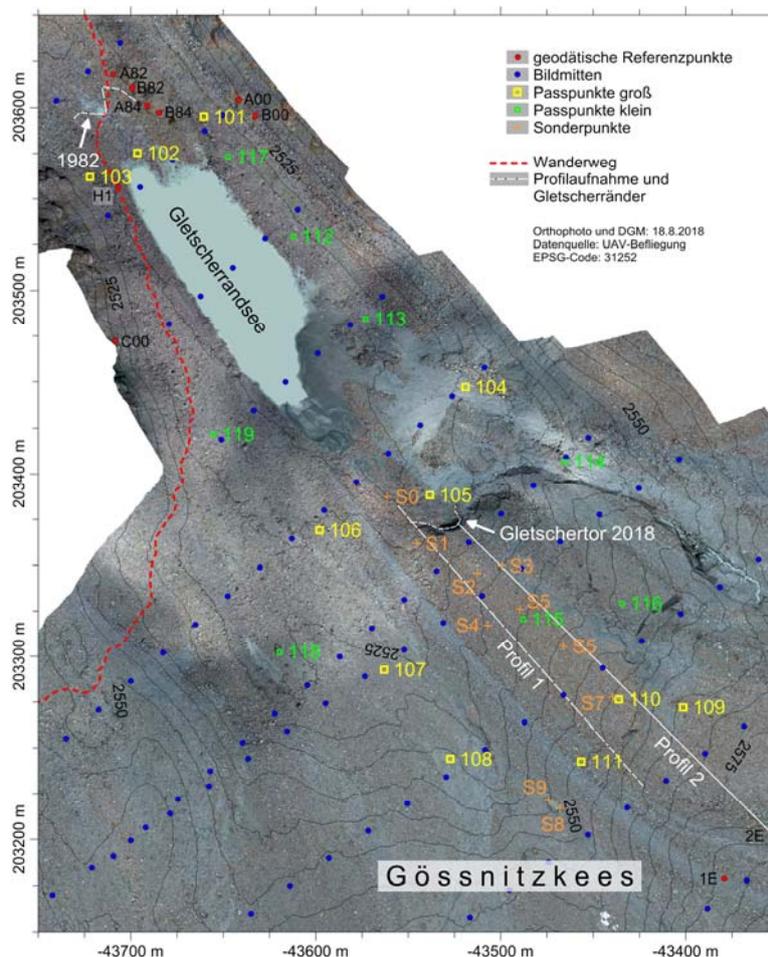


Abb. 4: Orthophotomosaik 2018

2.4 Airborne Laserscanning (ALS)

Vom Amt der Kärntner Landesregierung (KAGIS) wurde für das gegenständliche Projekt hochauflösende Höhendaten als DGM bzw. ein digitales Oberflächenmodell (DOM) im 1m-Raster

zur Verfügung gestellt. Der Unterschied zwischen DOM und DGM ist visuell kaum zu erkennen. Für alle weiterführenden Analysen wurde stets das DGM verwendet. Insbesondere dient das ALS-Modell als Höhenbezug, um etwaige systematische Offsets in den Höhen anderer Vergleichsdaten (Epochen/Methoden) erkennen und kompensieren zu können. Aus den statistischen Daten können Genauigkeitsaussagen abgeleitet werden. Aus praktischen Gründen wird von einem quasi fehlerfreien ALS-Modell ausgegangen.

2.5 Terrestrisch-photogrammetrische Vermessung

Der Einsatz der terrestrischen Photogrammetrie hat in der Gebirgskartographie und insbesondere in der Gletschervermessung eine lange Tradition (RINNER & BURKHARDT 1972). Am Beispiel des Gössnitzkeeses wurde versucht an diese Tradition anzuschließen. Es wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche analoge und digitale Kameras verwendet (KAUFMANN 2010). Aufgrund der topographischen Situation ist eine flächendeckende terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme des Gössnitzkeeses nicht möglich. Der zentrale Teil des Gletschers kann jedoch vom Gegenhang aus (oberhalb der 1850er-Moräne, am Wanderweg zum Roten Knopf gelegen) relativ gut eingesehen werden. 1988 wurde hier erstmals eine photogrammetrische Standlinie mit einem Phototheodoliten Zeiss TAL (Terrestrischen Ausrüstung Leicht) aufgenommen. Im Gelände sind derzeit vier terrestrisch-photogrammetrische Standpunkte (Abb. 3: L, R, M1 und M2), an denen vorzugsweise die Aufnahmen getätigt wurden, markiert. Eine optimale Stereokonfiguration ergibt sich für die Basislinie M2-R. Stand gerätetechnisch bedingt vorerst die Zweibildauswertung im Mittelpunkt, ist jetzt die Mehrbildauswertung Stand der Technik. Die Auswertung aller Epochen 1988-2015 erfolgte digital-photogrammetrisch (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2008b; KAUFMANN 2010; KAUFMANN & SEIER 2016). Die Auswertung auf einer klassischen digital-photogrammetrischen Arbeitsstation (ImageStation von Z/I Imaging), welche primär für den Luftbildfall entwickelt wurde, ist aufwändig und sicher nur dem Spezialisten vorbehalten. Eine Automatisierung des photogrammetrischen Auswerteprozesses ist/war in der gegebenen Aufnahmedisposition nicht möglich. Die Georeferenzierung der terrestrisch-photogrammetrischen Modelle erfolgt über 55 stabile natürliche Passpunkte, welche im absolut orientierten Modell 2003 (Rolleiflex 6006) gemessen wurden. Neue Möglichkeiten der photogrammetrischen Auswertung eröffneten Softwaresysteme auf Basis von Structure-from-Motion (SfM) Technologie. Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurden die kommerziellen Softwaresysteme PhotoModeler Scanner, Agisoft PhotoScan und Pix4Dmapper Pro verwendet. Es wurden unterschiedliche Konstellationen, wie z.B. klassischer Stereofall M2-R und Mehrbildfall (Aufnahmen aller vier Standpunkte), untersucht. Die monoskopische Messung der natürlichen Passpunkte stellt eine gewisse Fehlerquelle dar. Eine Signalisierung wäre prinzipiell möglich gewesen, wurde aber aus Zeitgründen nicht realisiert. Die terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen erfolgten stets zeitgleich mit der alljährlichen geodätischen Vermessung. Dies eröffnete die Möglichkeit, das terrestrisch-photogrammetrische Auswertergebnis in seiner Genauigkeit zu validieren. Der Vergleich der photogrammetrisch ermittelten Höhenprofile (Profil 1) mit den geodätischen Referenzmessungen zeigt in allen Fällen eine positive Systematik, insofern, dass das photogrammetrische Höhenprofil stets höher liegt (bis zu 0.53 m) als das geodätische. Dies liegt wahrscheinlich darin begründet, dass die geodätische Messung punktuell zwischen den Felsblöcken des aufliegenden Blockschutts getätigt wird und die photogrammetrische Messung eher die „Oberfläche“

erfasst. Aus den multitemporalen Aufnahmen lassen sich durch Epochenvergleich Längenänderung, Eisdickenänderung und Fließgeschwindigkeit des Gletschers ableiten. Von besonderem Interesse sind Zeitrafferdarstellungen zur Visualisierung der Oberflächenveränderung (Fließbewegung, Eisdickenänderung und sonstige Massenbewegungen). Diesbezügliche Computeranimationen siehe KAUFMANN (2018). Ergänzend zu den bereits bestehenden Auswertungen wird in diesem Beitrag die Gletscherveränderung zwischen 2015 (terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme mit einer Nikon D300) und 2018 (UAV-gestützte Datenerfassung) präsentiert. In der Differenzbildung der beiden DGM erfolgte eine Zentrierung der diesbezüglichen Höhenwerte auf die jeweils zeitgleich durchgeführten geodätischen Messungen.

3 Auswertergebnisse

3.1 Längenänderung

Das Gössnitzkees ist zwischen 1982 und 2018 kontinuierlich kleiner geworden. Die Lageänderung im Bereich der Gletscherstirn ist durch die alljährliche Vermessung (Trilateration, 1982-2002; Tachymetrie, zeitlich übergreifend 1996-2013; RTK-GNSS, seit 2014) gut dokumentiert. Die in Profilrichtung 1 gemessene Längenänderung beträgt insgesamt 286.5 m. Die mittlere Fließgeschwindigkeit liegt aktuell (2017-2018) bei 0.26 m/Jahr.

3.2 Eisdickenänderung

Die Eisdickenänderung wurde aus den geodätischen Profilmessungen (jährlich) und den erstellten DGM (jährlich bzw. mehrjährig) abgeleitet. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Eisdickenänderung in Profilrichtung 1. Für das Profil 1 ergibt sich eine mittlere jährliche Eisdickenänderung von -1.47 m/Jahr für den Beobachtungszeitraum 1998-2018. 1850 hatte das Gössnitzkees im Bereich des Gletscherrandsees (Punkt H1) eine Eismächtigkeit von ca. 81 m. Das aus den UAV-Aufnahmen abgeleitete Höhenprofil 1 wurde mit den geodätischen Messungen überprüft und stimmt nach Abspaltung eines systematischen Anteils von 0.064 m auf ± 0.104 m mit diesem überein.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen für den zentralen Bereich oberhalb der Gletscherstirn flächenhaft die mittlere jährliche Eisdickenänderung für die Zeiträume 2012-2018 bzw. 2015-2018.

3.3 Flächenänderung

Im Jahr 2012 betrug die Flächenausdehnung des Gössnitzkeeses 56.56 ha. Die Fläche des Gössnitzkeeses hat sich somit von 1850 bis 2012 um rund 64% verringert (Tab. 1). Der photogrammetrisch ermittelte Gletscherrand von 2012 ist jedoch geringfügig in den schuttbedeckten Bereichen unsicher und muss erst über die Auswertung einer jüngeren Epoche (etwa 2015) bestätigt werden.

3.4 Exakter Gletscherrand 2012

Durch die UAV-gestützte Luftbildaufnahme von 2018 steht eine aktuelle Geländeaufnahme zur Korrektur des vorläufigen Gletscherrandes 2012 im zentralen Bereich des Gletschers zur Verfügung. Die Abbildung 7 zeigt den korrigierten Verlauf des Gletscherrandes 2012 und somit die diesbezügliche Gletscherfläche. Die Analyse der Differenzhöhen in den stabilen, eisfreien Berei-

chen ergibt einen systematischen Offset von 0.126 m. Die Standardabweichung (1σ) beträgt ± 0.134 m. Das Signifikanzniveau in der Abb. 7 wurde mit 2σ gewählt.

3.5 Volumenänderung

In der Tab. 1 sind die berechneten Volumenänderungen für den Beobachtungszeitraum 2006-2012 angeführt. Als Referenz dient der rekonstruierte Gletscherstand von 1850.

Tab. 1: Gletscherveränderung 1850-2012

Epoche	Fläche (ha)	Flächenänderung kumulativ (%)	Volumenänderung kumulativ (Mill. m ³)	mittlere jährliche Eisdickenänderung (m/Jahr)
1850	155.56			
2006	62.92	-59.55	-84.52	-0.50 (1850-2006)
2009	60.92	-60.84	-85.95	-0.82 (2006-2009)
2012	56.56	-63.64	-87.89	-1.11 (2009-2012)

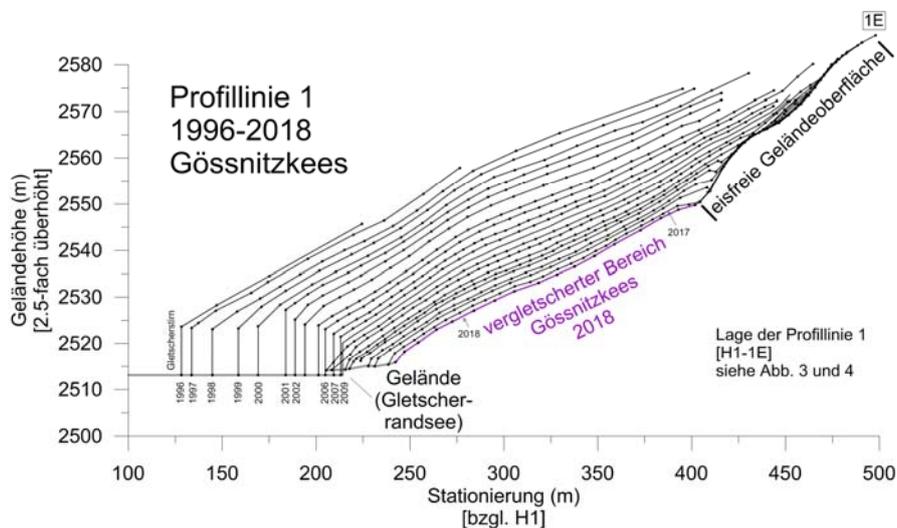


Abb. 5: Eisdickenänderung 1996-2018 entlang der Profilinie 1

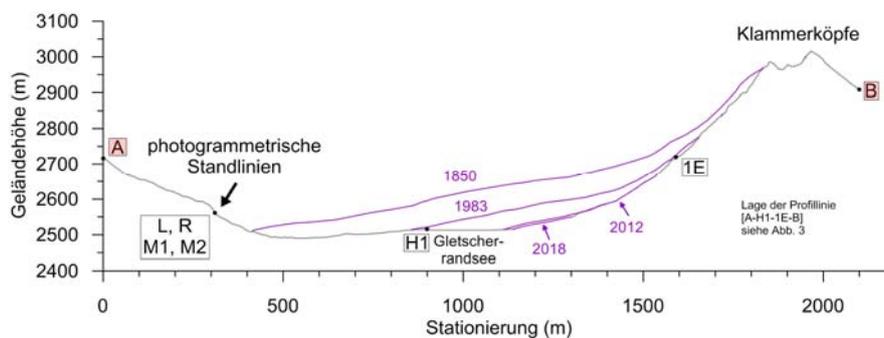


Abb. 6: Eisdickenänderung 1850-2018 entlang der Profilinie 1

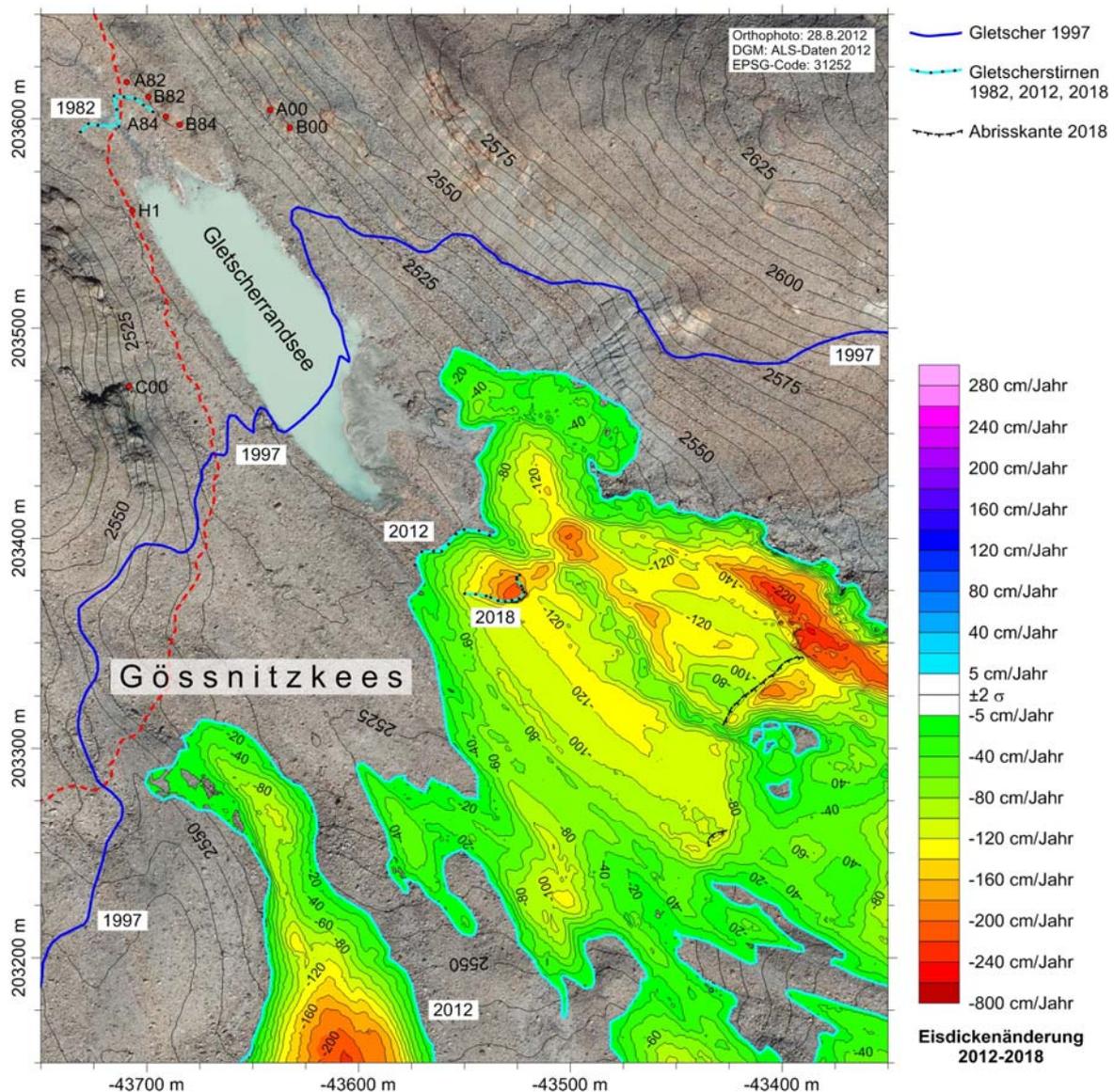


Abb. 7: Eisdickenänderung 2012-2018 im zentralen Bereich

4 Diskussion

Das Gossnitzkees zeigt sich als stark schuttbedeckter Gletscher ohne nennenswerte Nährgebiete für Schnee und Eis. Sämtliche Gletscherteilflächen liegen faktisch unterhalb der Gleichgewichtslinie. Bei den derzeit herrschenden regionalklimatischen Bedingungen ist ein nahezu vollständiges Abschmelzen des Gletschers vorhersehbar. Restflächen (mit Toteis) könnten sich in Gunstlagen noch über längere Zeit halten. Der Zerfall der Gletscherfläche ist nun auch im zentralen Teil des Gletschers offensichtlich. Das Eisfreiwerden von größeren Flächen, insbesondere im Fußbereich der Klammerköpfe und auch im orographisch linken Teil des Gletschers, ist durch unterschiedliche Messverfahren belegt.

ne UAV-Systeme mit der Möglichkeit einer zentimetergenauen direkten Georeferenzierung mittels RTK- bzw. PPK (Post-Processed Kinematic)-Technologie sind bereits im operationellen Einsatz und könnten daher für die Gletschervermessung im Allgemeinen und für das Gössnitzkees im Speziellen von Interesse sein (PIX4D 2018).

Tab. 2: Bewertung der eingesetzten Messverfahren

Messmethode	Vorteil	Nachteil	Genauigkeit
Totalstation	etabliertes Verfahren	schwere Ausrüstung, personalintensiv, nur Einzelpunktmessung, Begehung notwendig	$\pm 1-3$ cm
RTK-GNSS	etabliertes Verfahren, wetterunabhängig, leichte Ausrüstung	nur Einzelpunktmessung, Begehung notwendig, Abschattung, Multipath	$\pm 1-3$ cm
klassische Luftbildaufnahme	etabliertes Verfahren, großräumig, flächendeckend, gute Bodenauflösung, Bildorientierung durch AT meist bekannt	Aufnahmezyklus von 3 Jahren (BEV), kostenintensive photogrammetrische Workstation, Probleme bei Schnee-/Schattenflächen	homogene Genauigkeit, $\pm 10-15$ cm oder besser
UAV-gestützte Luftbildaufnahme	freie Wahl von Aufnahmezeitpunkt und Bodenauflösung, kosteneffizientes Verfahren, Möglichkeit der direkten Georeferenzierung (RTK/PPK), optimal für Detailstudien (z.B. im Zungenbereich), hohe Genauigkeit und geometrische Auflösung möglich, flächendeckend	administrative und rechtliche Hürden, wetterabhängig (Temperatur, Wind, Niederschlag), Einschränkungen im hochalpinen Bereich mit Abschattung, beschränkte Flächenleistung bei geringer Batterieleistung, Visual Line-of-Sight (VLOS), ohne RTK/PPK aufwändige Passpunktsignalisierung und -messung, Modelldeformationen, Begehung notwendig	homogene Genauigkeit, $\pm 3-5$ cm
Airborne Laserscanning (ALS)	flächendeckend, gute Auflösung, DOM, DGM, keine weitere Verarbeitung notwendig, gute Referenz für die Höhe	meist nur Daten einer Epoche vorhanden, Neuaufnahmen im Gebirge eher selten, Aufnahmeintervalle i. Allg. mehr als 10 Jahre	1m-Raster
terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme	billig (Consumer-Kamera, Software), Automatisierung der Auswertung, flächenhafte Information, hohe Auflösung (Phototextur), 3D-Auswertung in Punkten, Linien und Flächen, demokratisiertes Verfahren (kein Spezialwissen notwendig), leichte Ausrüstung, Einmannaufnahme möglich, Zeitrafferaufnahmen	Georeferenzierung über Passpunkte, wetterabhängig, abhängig von der topographischen Situation, Gegenhang notwendig, entfernungsabhängige Tiefenmessgenauigkeit, Modelldeformation	inhomogene Genauigkeit, in der Bildebene ± 1 Pixel bis Subpixel, in Aufnahmerichtung quadratisches Fehlergesetz, Genauigkeit auch abhängig von der Mehrfachüberdeckung

5 Resümee

Bezugnehmend auf das Beispiel Gössnitzkees bietet sich für das Langzeitmonitoring von kleinen Gletschern (in Österreich) bei einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr folgende Vorgangsweise an: (1) Gesamtauswertung, etwa alle drei Jahre, aus Luftbildern des BEV und (2) jährliche Vermessung der Gletscherstirn und mindestens eines Längsprofils mit RTK-GNSS und gegebenenfalls (3) ergänzende Auswertungen aus UAV-Befliegungen bzw. terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen (optional TLS-Aufnahmen) bei (4) gleichzeitiger Integration vorhandener ALS-Daten. Die Messungen am Gössnitzkees werden bis auf weiteres durchgeführt.

Nach dem völligen Abschmelzen des Gletschers werden Blockwerk und Schutt im Karbereich als stumme Zeugen der einstigen Vergletscherung zurückbleiben.

6 Dank

Besonderer Dank gilt allen Personen, die im Laufe der nahezu vier Jahrzehnte tatkräftig an dem Monitoringprojekt Gössnitzkees mitgewirkt haben. Die Sektionen Barmen & Wuppertal des Deutschen Alpenvereins haben das gegenständliche Gletschermonitoring stets wohlwollend (freies Quartier auf der Elberfelderhütte) unterstützt. Finanzielle Unterstützung erfolgte u.a. durch die Nationalparkverwaltung Hohe Tauern, Kärnten. Die UAV-Befliegung fand im Rahmen der NAWI Graz Forschungskoooperation zwischen den beteiligten Universitäten statt.

7 Literaturverzeichnis

- ABERMANN, J., FISCHER, A., LAMBRECHT, A. & GEIST, T., 2010: On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments. *The Cryosphere*, **4**, 53-65.
- AGISOFT, 2018: <http://www.agisoft.com/>, letzter Zugriff 21.12.2018.
- DJI, 2018: <https://www.dji.com/de/phantom-4>, letzter Zugriff 21.12.2018.
- FISCHER, A., PATZELT, G., ACHRAINER, M., GROß, G., LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BENDLER, G., 2018: Gletscher im Wandel – 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Springer Spektrum, Springer-Verlag, 139 S.
- FISCHER, A., SEISER, B., STOCKER-WALDHUBER, M., MITTERER, C. & ABERMANN, J., 2015a: Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere*, **9**, 753-766.
- FISCHER, A., SEISER, B., STOCKER-WALDHUBER, M., MITTERER, C. & ABERMANN, J., 2015b: The Austrian Glacier Inventories GI 1 (1969), GI 2 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) format. PANGAEA, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.844988>, letzter Zugriff 21.12.2018, supplement to FISCHER et al. 2015a.
- GANDER, D., HOLLINGER, G., LANZENDÖRFER, H. & STRAUSS, C., 2003: Virtueller Überflug der Schobergruppe (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten). Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, 70 S.
- MODER, T., 2008: Ermittlung der Volumen- und Flächenänderung von Gössnitz- und Hornkees aus Luftbildzeitreihen. Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, 52 S.
- KAUFMANN, V., 2010: Dokumentation des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees (Schobergruppe, Hohe Tauern) für den Zeitraum 1988-2009 mittels terrestrischer Photogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 19, Kohlhofer, G. & Franzen, M. (Hrsg.), 30. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 1.-3. Juli 2010 an der TU Wien, Tagungsband, 513-522.
- KAUFMANN, V., 2018: <https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html>, letzter Zugriff 21.12.2018.

- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2004: Documentation of the movement of the Hinteres Langtalkar rock glacier. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **35**(B7), 893-898.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2008a: Documentation of the retreat of Gössnitzkees and Hornkees Glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the time period 1997-2006 by means of aerial photogrammetry. *Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop*, 11-15 February 2008, Lenk, Switzerland, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zurich, Switzerland, 115-123.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2008b: Application of terrestrial photogrammetry for glacier monitoring in alpine environments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **37**(B8), 813-818.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2004: Documentation of the retreat of a small debris-covered cirque glacier (Gössnitzkees, Austrian Alps) by means of terrestrial photogrammetry. *Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop*, 30 September – 2 October 2004, Vall de Núria, Spain, *Monografies tècniques*, **8**, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 65-76.
- KAUFMANN, V. & LIEB, G.K., 2002: Investigations on the retreat of two small cirque glaciers (Gössnitzkees and Hornkees) in the Austrian Alps, Europe. *High-Mountain Remote Sensing Cartography 1998, Proceedings of the 5th International Symposium on the Use of Remote Sensing Data in Mountain Cartography*, *Karstad University Studies* 2002:27, 75-82.
- KAUFMANN, V. & PLÖSCH, R., 2000: Mapping and visualization of the retreat of two cirque glaciers in the Austrian Hohe Tauern National Park. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **33**(B4), 446-453.
- KAUFMANN, V. & SEIER, G., 2016: Long-term monitoring of glacier change at Gössnitzkees (Austria) using terrestrial photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41**(B8), 495-502.
- KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KENYI, L.W., 2009: Gletscherbewegungsmessung mittels satellitengestützter Radar-Interferometrie: Die Pasterze (Glocknergruppe, Hohe Tauern, Kärnten). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **42**(1), 85-104.
- KAUFMANN, V., SEIER, G., SULZER, W., WECHT, M., LIU, Q., LAUK, G. & MAURER, M., 2018: Rock glacier monitoring using aerial photographs: Conventional vs. UAV-based mapping – a comparative study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**(1), 239-246.
- KÄÄB, A., 2005: Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep. *Schriftenreihe Physische Geographie: Glaziologie und Geomorphodynamik*, **48**, Geographisches Institut der Universität Zürich, 264 S.
- KLINGHAN, T., 2017: Quantifizierung und Visualisierung des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees und Hornkees (Schobergruppe, Kärnten). Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, 43 S.
- LAMBRECHT, A. & KUHN, M., 2007: Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, **46**, 177-184.
- LANG, H. & LIEB, G.K., 1993: *Die Gletscher Kärntens*. Verlag des Naturwissenschaftlichen Vereins für Kärnten, Klagenfurt, 184 S.

- LIEB, G.K. & KELLERER-PIRKLBAUER, A., 2018: Gletscherbericht 2016/2017. *Bergauf* 2/2018, **73**(143), 20-29.
- MAYER, C., 2010: The early history of remote sensing of glaciers. *Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers*, P. Pellikka & W.G. Rees (Hrsg.), CRC Press, Taylor and Francis Group, 67-80.
- MODER, T., 2008: Ermittlung der Volumen- und Flächenänderung von Gössnitz- und Hornkees aus Luftbildzeitreihen. Unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, 52 S.
- PAAR, G., HUBER, N.B., BAUER, A., AVIAN, M. & REITERER, A., 2012: Vision-Based Terrestrial Surface Monitoring. *Terrigenous Mass Movements: Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*, Pradhan, B. & Buchroithner, M. (Hrsg.), Springer, Berlin, Heidelberg, 283-348.
- PIX4D, 2018: <https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison>, letzter Zugriff 21.12.2018.
- RINNER, K. & BURKHARDT, R. (Hrsg.), 1972: Gletscherphotogrammetrie. *Handbuch der Vermessungskunde (Jordan/Eggert/Kneissl)*, Band III a/2, Photogrammetrie, J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, § 121, 1428-1470.
- SEIER, G., KELLERER-PIRKLBAUER, A., WECHT, M., HIRSCHMANN, S., KAUFMANN, V., LIEB, G. K. & SULZER, W., 2017: UAS-Based Change Detection of the Glacial and Proglacial Transition Zone at Pasterze Glacier, Austria. *Remote Sensing* 2017, **9**(6), 549; [doi:10.3390/rs9060549](https://doi.org/10.3390/rs9060549).
- ZAMG, 2018: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/standpunkt/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur>, letzter Zugriff 21.12.2018.