

Kapitel 5 | Das Potential historischer Karten zur Rekonstruktion des Gletscherrückgangs im Gurgler Tal

André Baumeister

Zusammenfassung

Gegenstand des Artikels ist das Potential historischer Karten zur Rekonstruktion der zeitlichen Veränderung von Gletscherhöhen und deren Ausdehnung. Im Einzugsgebiet der Gurgler Ache am Pegel Obergurgl (Ötztal/Tirol) wurden Gletschergrenzen und Höhenlinien mehrerer historischer Kartenblätter aus den Jahren 1952 und früher digitalisiert und miteinander verglichen. Neben der Veränderung der Fläche können über die Höhenlinien Informationen zur Entwicklung der Eismächtigkeit eines Gletschers gewonnen werden. Hierzu werden im Bereich der Gletscherfläche mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) digitale Geländemodelle erzeugt, aus denen rechnerisch das Verlustvolumen eines Betrachtungszeitraums ermittelt werden kann.

Darüber hinaus wurden weitere historische Quellen verwendet, um den Rückzug des Gurgler Ferners im Zungenbereich mit einer bestmöglichen zeitlichen Auflösung zu dokumentieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern eine Ergänzung zum bestehenden Österreichischen Gletscherinventar und anderen Forschungs-

projekten, die sich mit der Entwicklung der Gletscher im Gurgler Tal beschäftigen.

Abstract

The article at hand discusses the potential of historical maps to reconstruct the development of glaciers in terms of their expansion and elevation. Glacier boundaries and contour lines of several historical maps of the drainage basin ‚Pegel Obergurgl‘ (Ötztal/Tirol) were digitalized and analyzed to obtain information about changes in ice thickness and extension of the glaciers. By generating digital terrain models of the glaciers surface using GIS, it was possible to determine the amount of ice lost during the observation period. Other historical sources of the ‚Gurgler Ferner‘ could then be used to further increase the temporal and spatial precision of the data in the area of the glacial terminus.

The results of this study provide a complement to the existing Austrian glacier inventory and other research projects that deal with the development of the glaciers in the Gurgler Valley.

1. Einleitung

Der Rückzug der Alpengletscher als Folge des Klimawandels ist ein in Wissenschaft (Abermann et al. 2009) und Medien häufig diskutiertes Thema. Ihr Verhalten ist weltweit ein wichtiger Indikator für klimatische Veränderungen (IPCC 2007). Der Rückzug der Gletscher ist jedoch keinesfalls nur von wissenschaftlichem Interesse. Als wichtigster Süßwasserspeicher beeinflussen die Gletscher die Abflussregime zahlreicher Flüsse in den Alpen und in nahezu allen Fließgewässern, von denen Teileinzugsgebiete im Hochgebirge liegen. Eine Veränderung des Eisvolumens hat Konsequenzen für die Wasserwirtschaft und somit für die Land- und Energiewirtschaft zahlreicher Regionen (Braun & Weber 2008, Psenner 2007). Darüber hinaus besitzen Gletscher einen hohen Stellenwert für den Tourismus, sowohl für den Gletscherskitourismus, als auch als ästhetisches Landschaftselement für die Wanderer und Bergsteiger in den Sommermonaten.

In wohl keinem Gebirge der Welt ist die Entwicklung der Gletscher so gut dokumentiert wie in den Alpen. In zahlreichen Forschungsprojekten werden Monitoring-Programme für einzelne Gletscher oder ganze Regionen betrieben, während auf nationaler Ebene die Entwicklung der Gletscher in Gletscherinventaren dokumentiert wird (Lambrecht & Kuhn 2007).

Trotz dieser Fülle an Daten beschränken sich mehrjährige Messreihen auf wenige ausgewählte Gletscher und nationale Inventare bieten nur eine grobe zeitliche Auflösung (Abermann et al. 2009). Historische Orthofotos und Karten bieten eine Möglichkeit, die zeitliche und räumliche Auflösung der bestehenden Inventare zu verbessern. Die Entwicklung der Gletscherfläche kann so einfach und kostengünstig dokumentiert werden. Darüber hinaus ermöglichen Karten, deren Höheninformationen über photogrammetrisch ausgewertete Luftbilder ermittelt wurden, Aussagen über die Veränderung der Eismächtigkeit. Mit Hilfe von Geoinformationssystemen (GIS) kann über Digitale Geländemodelle (DGM) die Entwicklung des Eisvolumens berechnet werden. Die Geländemodelle stammen aus historischen Karten. Hierzu werden die Höheninformationen der Höhenlinien dazu verwendet, mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens ein Geländemodell zu erzeugen. Das hier beschriebene geodätische Verfahren wurde unter Verwendung bestehender Höhenmodelle bereits in zahlreichen Untersuchungen angewendet (Gspurning et al. 2004, Lambrecht & Kuhn 2007, Abermann et al. 2009). Das mögliche Potential aller verfügbaren historischen Karten für die Rekonstruktion der Flächen- und Volumenveränderung der Öztaler Gletscher wurde bisher nur in Ansätzen untersucht und soll in diesem Artikel für das ausgewählte Einzugsgebiet geprüft werden.

2. Stand der Forschung

Möglichkeiten zur Rekonstruktion und Dokumentation der Entwicklung von Gletschern

Die maximale Ausdehnung der Alpengletscher zum Ende der kleinen Eiszeit 1850 ist in der Regel durch dominante End- und Seitenmoränen gekennzeichnet, die sich durch ihre Lage und Mächtigkeit oft deutlich von Moränen jüngerer Phasen unterscheiden (Veit 2002).

Häufig bieten somit geomorphologische Kartierungen oder aufmerksame Beobachtungen im Gelände erste Anhaltspunkte über die Veränderung der Eisausdehnung (Patzelt 1982). Über die Kenntnis der ursprünglichen Ausdehnung und Mächtigkeit des Eises und die Form des Reliefs können darüber hinaus Aussagen zum ursprünglichen Eisvolumen getroffen werden. Oft dokumentieren alte Fotografien oder Postkarten historische Gletscherstände. Im deutschen Gletscherarchiv der Gesellschaft für ökologische Forschung e.V. in München sind diese Quellen ländersübergreifend für zahlreiche Alpengletscher zusammengefasst (www.gletscherarchiv.de). Neben der reinen Dokumentation der Längen- und Flächenveränderung existieren für wenige Gletscher Massenbilanzen variierender zeitlicher Auflösung, welche durch unterschiedliche Verfahren ermittelt werden. Mit der direkten glaziologischen Methode werden mit Hilfe von Schnee- und Ablationspegeln, Schneetiefen- und Schneedichteprofilen genaue jährliche Massenbilanzen ermittelt (Fi-

scher 2011). Existiert eine Abflussmessstelle, mit der sich die gesamte Schmelzwassermenge des Gletschers erfassen lässt, können jährliche Massenbilanzen auch über hydrologische Verfahren ermittelt werden. In den Öztaler Alpen wurden am Vernagtferner seit 1964 jährliche Massenbilanzen erhoben (Braun et al. 2007). Lange Zeitreihen zur Massenbilanz sind in den Alpen eher selten und beschränken sich meist auf einzelne Gletscher (Gspurning et al. 2004, Braun et al. 2007, Fischer 2011). Monitoring-Projekte werden zudem von unterschiedlichen Institutionen betrieben und bedienen sich verschiedener Methoden, so dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich ist.

Mit Hilfe des österreichischen Gletscherinventars wird zum ersten Mal die Entwicklung aller österreichischen Gletscher erfasst, um Veränderungen flächendeckend dokumentieren zu können. Gletscherinventare existieren für die Jahre 1969, 1997 und 2006 und wurden aus unterschiedlichen Datenquellen erzeugt. Die Grundlage für das Inventar von 1969 sind Luftbilder, die von Groß (1987) photogrammetrisch ausgewertet und später von Lambrecht & Kuhn (2007) digitalisiert wurden. Das Inventar von 1997 wurde ebenfalls basierend auf photogrammetrisch ausgewerteten Luftbildern erzeugt. Dabei wurden neben der Gletscherfläche mit Hilfe digitaler Höhenmodelle die Gletscherhöhen ausgewertet. Der Fehler der hier verwendeten Höhenmodelle liegt bei $\pm 0,71$ m (Lambrecht & Kuhn 2007). Die Daten für das Modell von 2006 stammen aus hochauflösenden Laserscann-Befliegungen (Abermann et al. 2009).

Die hieraus abgeleiteten Höhenmodelle ermöglichen eine Berechnung von Volumenveränderungen über das geodätische Verfahren (Reinhardt & Rentsch 1986).

Für dieses Verfahren werden mindestens zwei digitale Geländemodelle (DGM) gleicher Auflösung benötigt. Eine Rasterzelle wird in einem DGM über ihre Koordinaten definiert und besitzt zusätzlich einen z-Wert zur Kennzeichnung der Höhe. Verringert ein Gletscher sein Eisvolumen, so schlägt sich diese Veränderung in der Verkleinerung der Fläche und/oder in einem Verlust der Mächtigkeit nieder. Dieser Höhenverlust kann für jede Rasterzelle mit Hilfe einer Differenzberechnung der z-Werte zweier Geländemodelle unterschiedlichen Alters in einem Geoinformationssystem berechnet werden. Da die Größe einer Rasterzelle bekannt ist, kann mit Hilfe der Höhendifferenz auch das Verlustvolumen jeder Zelle ermittelt werden.

Historische Karten als Archiv der Gletscherentwicklung

Bereits durch die Römer wurde eine vollständige Abbildung der Alpen in Karten des römischen Reiches angestrebt. Da das Hochgebirge jedoch in erster Linie ein Hindernis darstellte und das römische Interesse hauptsächlich dem Erhalt der Handelswege über die Pässe und in den großen Alpentälern galt, beschränkte sich die kartographische Beschreibung ausschließlich auf diese Bereiche (Brodersen 1995). Bis ins 17. Jahrhundert ging der Informationsgehalt der Karten nur wenig über die Verortung von Gemeinden und Handelswegen hinaus. Nur selten wurde eine realitätsnahe Darstellung der Topographie angestrebt (Abb. 1). Erstmalig im Atlas Tyrolensis (Anich & Huber 1774) wurde 1774 eine Karte veröffentlicht, die eine detailgetreue Darstellung des Reliefs und die Benennung von markanten



Abb. 1: Tirolische Landtafel von 1611 (Quelle: Tiroler Landesarchiv)

Berggipfeln und Gletschern zeigt (Abb. 2). Mit der dritten Landesaufnahme im Maßstab 1:25.000 aus den Jahren 1870-1873 wurde

über die Darstellung von Höhenlinien die Abbildung der Orographie erneut verbessert (Abb. 3). Eine Optimierung vermessungs-

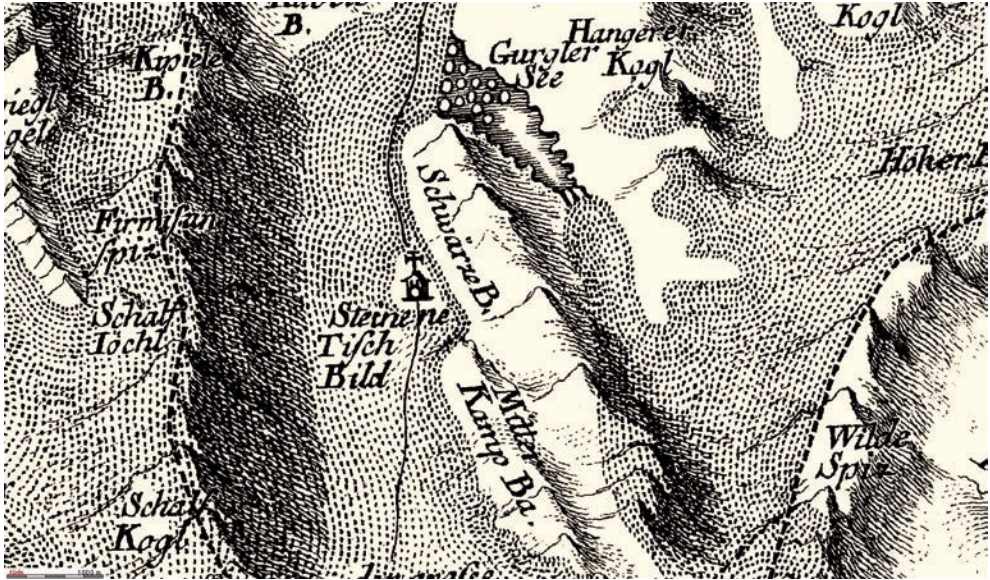


Abb. 2: Atlas Tyrolensis von 1774 (Quelle: Tiroler Landesarchiv)

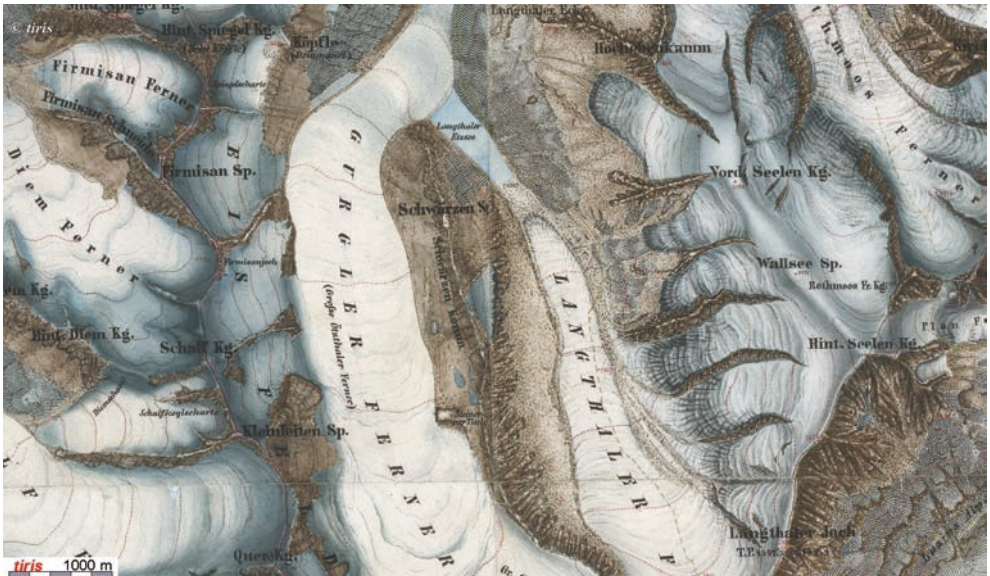


Abb. 3: Dritte Landesaufnahme von 1870-73 (Quelle: Tiroler Landesarchiv)

technischer Methoden und ihrer Anwendung lag in dieser Zeit maßgeblich im Interesse des Militärs, weshalb die Landesaufnahme unter der Federführung des militärgeographischen Instituts erfolgte (Beimrohr 2012).

Erst mit der Aufnahme von Luftbildern und ihrer photogrammetrischen Auswertung zur Erstellung topographischer Karten wurde Kartenmaterial produziert, welches den Genauigkeitsansprüchen an die Höheninformationen der hier beschriebenen Untersuchung gerecht wird. In den Alpen wurden großflächige Befliegungen erstmalig nach dem zweiten Weltkrieg von den alliierten Streitkräften durchgeführt (Fasching 2000). Das genaue Jahr der Befliegung ist oft nicht mehr nachvollziehbar, so dass meist das Jahr der Kartenveröffentlichung als Anhaltspunkt für die zeitliche Einordnung dient. Für die Öztaler Alpen liegt ein solches Kartenwerk erstmalig für das Jahr 1952 vor. Aus dem gleichen Zeitraum stammt das Kartenblatt des Deutschen Alpenvereins (DAV) von 1949. Nach Informationen des DAV wurden Karten dieser Zeit mittels terrestrischer Photogrammetrie erstellt. Sie entsprechen den hier geforderten Ansprüchen an Genauigkeit. Das Blatt Obergurgl des DAV liegt dem Verfasser bisher nicht vor und konnte deshalb nicht genauer geprüft werden, so dass in dieser Arbeit für den genannten Zeitraum nur die Karte des US Army Map Service verwendet wurde.

Erst 1974 wurde vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) eine Neuaufnahme mittels Aerophotogrammetrie realisiert. Nach Thomas Knoll (persönliche Mitteilungen 2012), Leiter des Kartenarchivs

im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, existierte bis zur Neuaufnahme lediglich ein provisorisches amtliches Kartenblatt in 1:50.000 (ÖK 50) basierend auf einer terrestrischen Geländeaufnahme aus dem Jahre 1888/89. Die hieraus abgeleiteten Höhenlinien sind Ergebnis einer zumeist händischen Interpolation, so dass diese Karte für die eigenen weiteren Auswertungen nicht verwendet wurde. Es bleibt zu prüfen, inwieweit sich eine digitale Verarbeitung der frühen ÖK 50 für die eigene Zielsetzung eignet. Die Grundlage aller weiteren Auswertungen bildeten zunächst nur Karten, die auf photogrammetrisch ausgewerteten Luftbildern beruhen.

3. Untersuchungsgebiet

Das im Rahmen dieses Artikels bearbeitete Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf das Einzugsgebiet der Gurgler Ache am Pegel Obergurgl in den Öztaler Alpen/Tirol (Abb. 4). Der Messpegel befindet sich unterhalb der Gemeinde Obergurgl auf einer Höhe von 1878,64 m. Er wurde 1946 errichtet und zunächst nur zur Aufzeichnung von Wasserständen mittels Lattenpegel verwendet (Hydrographischer Dienst in Österreich 2009). Seit 1966 stehen tägliche Abflussdaten zur Verfügung, die online abgerufen werden können. Die Gurgler Ache durchfließt auf einer Länge von ca. 16 km das Gurglertal und vereinigt sich in Zwieselstein mit der Venter Ache zur Öztaler Ache.

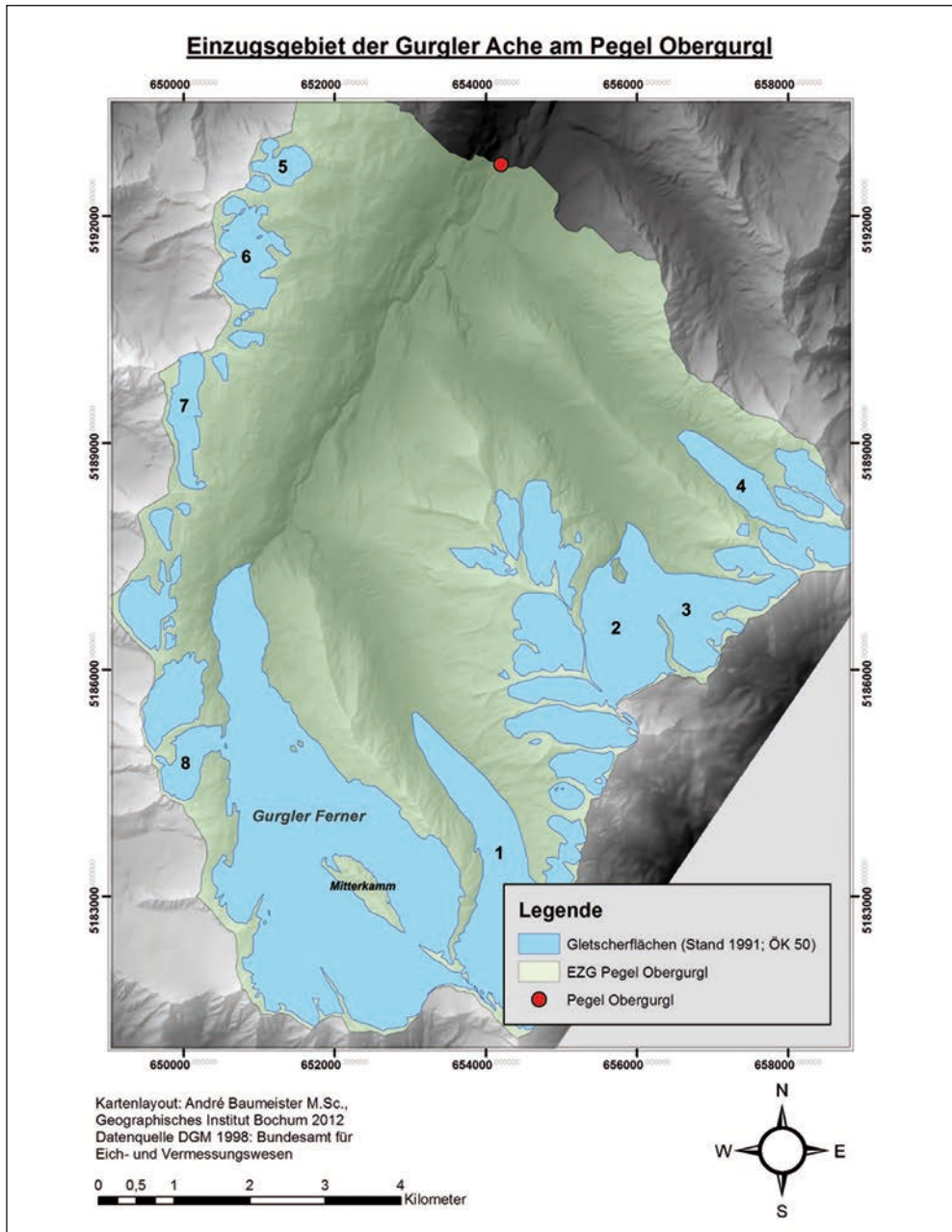


Abb. 4: Untersuchungsgebiet im Einzugsgebiet der Gurgler Ache. Zusätzlich markiert wurden folgende Gletscher: Langtaler Ferner (1), Wasserfallferner (2), Rotmoosferner (3), Gaisbergferner (4), Lehnerferner (5), Manigenbachferner (6), Ramolferner (7) und Kleinleitenferner (8)

Das Einzugsgebiet oberhalb des Pegels hat eine Größe von 72,5 km² und ist zu ca. 30 % vergletschert. Der größte Gletscher im Untersuchungsgebiet ist der Gurgler Ferner. Mit einer Fläche von ca. 9,5 km² ist er gleichzeitig der drittgrößte Gletscher des Landes Tirol. Dahinter folgt der östlich benachbarte Langtaler Ferner (Abb. 4, 1) mit einer Fläche von 2,9 km² (Stand 1997 nach Fischer et al. 2010). Die Beschränkung auf das Einzugsgebiet der Gurgler Ache und die Verfügbarkeit der Abflussdaten ermöglichen vergleichende Betrachtungen von Abflussdaten und Gletscherentwicklung.

4. Material und Methoden

Verwendetes Kartenmaterial

In Tab. 1 sind alle Karten aufgelistet, die hinsichtlich ihrer Eignung für die Untersuchungen dieser Arbeit überprüft wurden. Die für eine Untersuchung der Gletscherflächen- oder volumenveränderungen geeigneten Karten sind unterstrichen. Die letztendlich verwendeten Karten wurden zusätzlich rot markiert. Geeignete Karten wurden über photogrammetrisch ausgewertete Luftbilder erzeugt, deren Aufnahme unmittelbar vor der Erstellung der Karte stattgefunden hat. Nur so entsprechen Ausdehnung und Höheninformationen der Gletscher dem angegebenen Stand der Karte. Während der häufigen Aktualisierungen, die oft aus Geländebegehungen resultierten,

wurden die Gletscher nicht neu vermessen. In Einzelfällen wurde zwar der Gletscherrand aktualisiert, die Höheninformationen wurden aber belassen. Aktualisierte Karten sind demnach für das hier vorgestellte Verfahren nicht geeignet. Die Befliegungen der Neuaufnahmen wurden nach Thomas Knoll (persönliche Mitteilung 2012) ein bis maximal zwei Jahre vor der Veröffentlichung durchgeführt. Ein Ausschnitt der Karte des US Army Map Service von 1952 ist in Abb. 5 dargestellt.

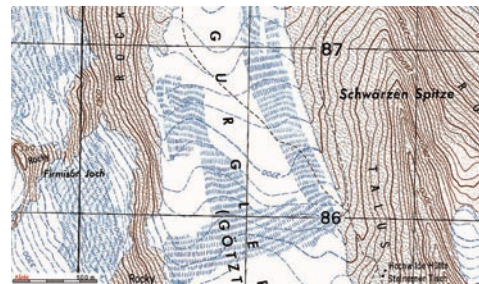


Abb. 5: Karte des US Army Map Service von 1952 (Quelle: Tiroler Landesarchiv)

Die Karte liegt im Maßstab 1:25.000 vor und zeigt Isolinien mit einer Äquidistanz von 20 m. Verwaltet und archiviert werden die Karten vom Tiroler Landesarchiv. Ein Zugriff ist über das Online-Portal *tiris* des Landes Tirol möglich (*tiris* Kartendienste 2013). Die weiteren verwendeten Karten aus den Jahren 1974 und 1991 sind jeweils historische Ausgaben der ÖK 50 des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV) im Maßstab 1:50.000 mit einer Äquidistanz der Isolinien von 20 m. Beide Blätter wurden als Scans über das Kartenarchiv des BEV bezogen. Das Ergebnis der Neuaufnahme von 1998 wurde an dieser Stelle nicht verwendet. Die Befliegung

Tab. 1: Verfügbares Kartenmaterial des Untersuchungsgebietes seit 1888

Jahr der Veröffentlichung / Stand	Herausgeber	Art der Aufnahme / Aktualisierungsgrundlage	Eignung für Kartierung Gletscherfläche	Eignung für gravimetrisches Verfahren
<u>1888</u>	BEV	terrestrische Photogrammetrie	ja	nein
<u>1949</u>	Alpenverein	Neuaufnahme, terrestrische Photogrammetrie	ja	ja
<u>1952</u>	US Army Map Service	Neuaufnahme, Aerophotogrammetrie	ja	ja
<u>1955</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1965</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1968</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1974</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1974</u>	BEV	Neuaufnahme, Aerophotogrammetrie	ja	ja
<u>1977</u>	Alpenverein	vollständige Neugestaltung auf BEV-Grundlage	nein	nein
<u>1982</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1982</u>	BEV	geringfügige Anpassungen an ausgewählten Gletschern	nein	nein
<u>1988</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge	nein	nein
<u>1991</u>	BEV	Neuauswertung der Gletscher, Aerophotogrammetrie	ja	ja
<u>1993</u>	Alpenverein	nicht spezifizierte Nachträge nach Geländebegehungen	nein	nein
<u>1998/1997</u>	BEV	Neuaufnahme, Aerophotogrammetrie	ja	ja
<u>2000</u>	Alpenverein	digitale Nachführung, Situationsergänzungen auf BEV-Grundlagen	nein	nein
<u>2004/05</u>	BEV	Umstellung auf ÖK50-UTM, Aktualisierung der Gletscherausdehnung	ja	nein
<u>2008</u>	Alpenverein	Gletscherrandbereinigung nach Luftbildern	ja	nein

für diese Aufnahme aus dem Jahr 1997 ist gleichzeitig Grundlage des zweiten Gletscherinventars und darüber hinaus das aktuellste verfügbare DGM des Untersuchungsgebietes. Das Höhenmodell liegt in einer Rastergröße von 10 x 10 m vor und wird vom BEV als digitaler Datensatz zur Verfügung gestellt. Die Berechnungen der Volumenveränderung der Gletscher im Einzugsgebiet wurden auf Grundlage dieses Geländemodells und des jeweils betrachteten historischen Geländemodells durchgeführt.

Auf der Grundlage zusätzlichen Kartenmaterials wurde darüber hinaus der Rückgang der Eisrandlage in höherer zeitlicher Auflösung rekonstruiert. Hierzu zählt u.a. die von Patzelt (1982) veröffentlichte Karte des Gurgler Ferners im Maßstab 1:10.000, auf der Eis-

randlagen unterschiedlichen Alters seit 1850 eingetragen sind. Als Kartengrundlage diente eine vom BEV durchgeführte Befliegung aus dem Jahr 1981. Weiters wurden die in den Gletscherinventaren der Jahre 1969 und 1997 erfassten Eisrandlagen berücksichtigt. Die jüngste kartierte Eisrandlage ist einem Luftbild des Jahres 2009 entnommen. Im Luftbildatlas Tirol werden online über die Plattform *tiris* aktuelle und historische Luftbilder zur Verfügung gestellt. Die aktuellen Luftbilder des DAV aus dem Jahr 2003 sind über die digitalen Kartenwerke erhältlich und dienen hier als Grundlage für die kartographische Darstellung des Gurgler Ferners (Stand 2009). Eine Zusammenfassung aller in dieser Arbeit verwendeten Karten befindet sich in chronologischer Reihenfolge in Tab. 2.

Tab. 2: Verwendetes Kartenmaterial

Jahr der Veröffentlichung / Stand	Quelle	Verwendung Fläche Gurgler Ferner	Verwendung gravimetrisches Verfahren
1952	US Army Map Service	x	x
1969	Gletscherinventar	x	
1974	BEV	x	x
1981	BEV / Kartierung Patzelt	x	
1991	BEV	x	x
1997	DGM 10 / BEV		x
1998/1997	BEV	x	
2003	DAV	x	
2009	Luftbildarchiv tiris	x	

Georeferenzierung und Digitalisierung historischer Karten

Alle verwendeten Kartenblätter standen vor ihrer Bearbeitung in nicht georeferenzierter Form als digitaler Scan zur Verfügung, d.h. die Bilddatei verfügten über keinen räumlichen Bezug. Als Grundlage für die Georeferenzierung diente das Gitternetz des österreichischen Bundesmeldenetzes im Gauß-Krüger Format (M28), das den Karten aufgedruckt ist. Um den möglichen Lagefehler klein zu halten, wurden die Referenzierungspunkte gleichmäßig in hoher Dichte über das Kartenblatt verteilt. Die auf diesem Weg georeferenzierten Karten des BEV dienten als Vorlage für die Georeferenzierung von gitternetzlosen Luftbildern und Karten, die auf anderen Bezugssystemen basieren (US Army Map 1952). Hierfür wurden eindeutig identifizierbare Referenzierungspunkte wie Hütten oder Berggipfel gewählt.

Die Digitalisierung des Gletscherrandes erfolgte mit einem GIS. Je nach Eignung der Karte wurden alle Gletscherflächen im Einzugsgebiet der Gurgler Ache vollständig digitalisiert.

Berechnung von Eisvolumenveränderungen mit Hilfe des gravimetrischen Verfahrens

Um aus den Höheninformationen der Karten Geländemodelle ableiten zu können, mussten zunächst für jede Karte alle Höhenlinien auf den Gletscherflächen digitalisiert werden. Damit eine realitätsnahe Interpolation der Glet-

scherhöhen erreicht werden konnte, wurden die Höhenlinien deutlich über den Rand des Gletschers hinaus digitalisiert. Die Interpolation der historischen Geländemodelle erfolgte in ArcGIS mit Hilfe der Methode *Topo to Raster*, die bereits von Gspurning et al. (2004) und Fischer (2011) verwendet wurde. Nach Esri (2013) zeichnet sich die Methode vor allem durch hydrologisch korrekte Ergebnisse aus. Es handelt sich hierbei um das einzige auf linienhafte Eingabedaten ausgerichtete Interpolationsverfahren. Die Zellengröße des interpolierten Geländemodells muss an die des aktuellen DGMs angepasst werden. In diesem Fall handelt es sich um ein Raster mit einer Auflösung von 10 x 10 m. Mit Hilfe der vorher digitalisierten Polygone der Gletscherflächen wurden die interpolierten Geländemodelle auf die tatsächlichen Gletscherflächen des jeweiligen Jahres reduziert. Die so erzeugten Geländemodelle geben die Höhe der historischen Gletscheroberfläche wieder. Mit Hilfe des in ArcGIS integrierten *Raster Calculators* können die Höhen des aktuellen Geländemodells (DGM t_2) von den Höhen des interpolierten, auf Basis der historischen Karten entstandenen Geländemodells (DGM t_1) subtrahiert werden. Dieser Rechenschritt erzeugt ein Raster, welches die Höhenveränderung der Gletscheroberfläche zwischen dem Zeitpunkt t_1 und dem Zeitpunkt t_2 darstellt. Da Länge und Breite der Rasterzellen bekannt sind, kann über die Höhendifferenz (t_1-t_2) das Volumen für jede Zelle bestimmt werden. Hierzu stehen in ArcGIS die Funktionen *Surface Volume* und *Cut Fill* zur Verfügung (Klaus & Baumeister 2012).

5. Ergebnisse

Gletscherstände des Gurgler Ferners zwischen 1850 und 2009

Wie bereits beschrieben wurden in allen betrachteten Karten zunächst die Gletscherflächen digitalisiert. Da einige Karten und Luftbilder keine oder nur unvollständige Höheninformationen enthalten, konnten aus ihnen keine Höhenmodelle interpoliert werden. Um der Gesamtheit der Karten und Luftbilder Rechnung zu tragen, wurden alle Gletscherstände der untersuchten Quellen für den Zungenbereich des Gurgler Ferners zusammengetragen. Die Ergebnisse aus der Digitalisierung aller verfügbaren Informationen des Gletscherstandes am Gurgler Ferner sind in Abb. 6 dargestellt. Nicht dargestellt wurden in der Karte die Gletscherstände der Jahre 1969 (Gletscherinventar) und 1981 (Digitalisierung der Gletscherfläche aus Patzelt 1982), da zwischen den beiden Jahren kaum Veränderungen zu beobachten waren. Lediglich im Bereich der Zungenspitze ist ein geringer Vorstoß zu erkennen, der zu Beginn der 1980er Jahre bei vielen Gletschern beobachtet werden konnte. In diesem Betrachtungsmaßstab würde eine Darstellung weiterer Eisrandlagen lediglich die Qualität der Darstellung beeinträchtigen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich die maximale Ausdehnung des Gurgler Ferners zum Ende der Kleinen Eiszeit 1850. Zu dieser Zeit erstreckte sich der Eiskörper bis über den Taleingang des Langtales hinaus, wodurch das Schmelzwasser des Langtaler Ferners aufgestaut wurde. Hier bildete sich der Gurgler Eisstausee, dessen Ablagerungen am Talboden des Langtales zu finden sind. Die Eisrandlagen nach Patzelt (1982) stützen sich auf geomorphologische Kartierungen. Insgesamt hat sich der Gurgler Ferner zwischen den Jahren 1850 und 2009 um knapp 2,5 km zurückgezogen. Insbesondere im westlichen Bereich der Karte fällt jedoch auf, dass sich die Eisrandlage kaum verändert hat. Hier bestimmt die Geländemorphologie maßgeblich das Verhalten des Gletschers. Im steilen Gelände bedingt eine Abnahme der Mächtigkeit nur eine geringe Verschiebung des Eisrandes. Dies lässt vermuten, dass sich bei negativen Massenbilanzen der Volumenverlust besonders in einer Verringerung der Mächtigkeit und weniger einem Rückzug der Gletscherfront niederschlägt. Im Jahr 2009 trennen sich zum ersten Mal die zwei zuvor miteinander verbundenen Akkumulationsgebiete östlich und westlich des Mitterkamms. Eigene Kartierungen zeigten noch im Vorjahr eine Verbindung zwischen den zwei Gletscherzungen, die bereits 2011 deutlich über 100 m voneinander getrennt waren.

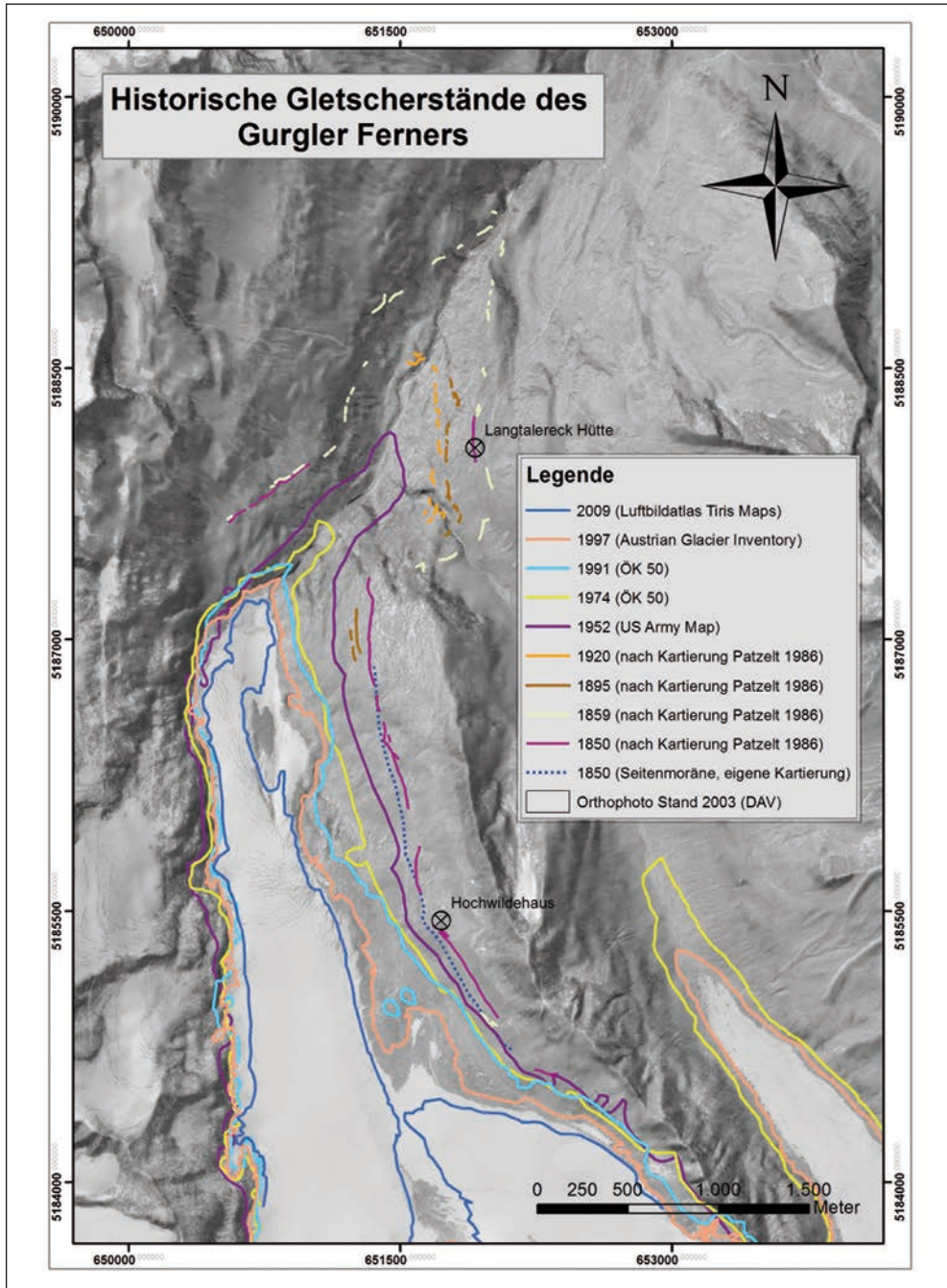


Abb. 6: Entwicklung der Gletscherstände des Gurgler Ferners zwischen 1850 und 2008

Veränderung der Gletscheroberfläche im Einzugsgebiet der Gurgler Ache zwischen 1952 und 1997

Die Flächenberechnungen der mit Eis bedeckten Flächen im Untersuchungsgebiet (Tab. 3) wurden mittels der durch die Digitalisierung gewonnenen Flächendaten der Jahre 1952, 1974, 1991 und 1997 durchgeführt und mit den Daten des Gletscherinventars des Jahres 1969 ergänzt. Noch 1952 war das Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 72,5 km² auf einer Fläche von 29 km² mit Eis bedeckt. Bis 1997 reduzierte sich diese Fläche um ca. 25 % auf 23 km².

Für den Zeitraum 1952-1997 zeigen sich Höhenabnahmen von > 100 m. Wie vermutet befinden sich diese maximalen Mächtigkeitsverluste insbesondere im Bereich der Zunge des Gurgler Ferners, in der sogenannten Gletscherschlucht. Weitere derartig große Höhenverluste treten ebenfalls in den Zungenbereichen der Talgletscher des Langtaler-, Rotmoos- und Gaisbergferners auf. Darüber hinaus zeigen sich große Höhenverluste im Bereich westlich des Hochwildehauses (Abb. 7). Das Relief dieses heute eisfreien Bereichs zeichnet sich durch ein ausgeprägtes Becken aus. Die geringsten Höhenabnahmen zeigen sich in den höher gelegenen Kar- und

Tab. 3: Veränderung der Gletscherfläche im Einzugsgebiet

Jahr	Gletscherfläche in km ²	Abnahme in % zum vorherigen Stand	Abnahme in % zur Ausgangsfläche
1952	29,03	-	-
1969	27,57	5,29	5,29
1974	26,99	2,14	7,55
1991	25,36	6,40	14,44
1997	23,13	9,65	25,49

Veränderung des Eisvolumens im Einzugsgebiet der Gurgler Ache in den Jahren 1952, 1974 und 1991

Die Ergebnisse des in „Material und Methoden“ beschriebenen Verfahrens sind in den Abb. 7, 8 und 9 dargestellt. Zu sehen ist jeweils die Höhenveränderung im Bereich des Gletschers zwischen dem Geländemodell des jeweiligen Betrachtungsjahrs und dem aktuellen DGM aus dem Jahr 1997.

Hängegletschern wie dem Wasserfallferner und dem Kleinleiten Ferner. Höhenzunahmen zeigen sich am Lehner Ferner. Für diesen Betrachtungszeitraum scheinen jedoch Mächtigkeitszunahmen dieser Art auf Interpolationsfehler, bedingt durch die Steilheit des Geländes, zurückzuführen zu sein. Das errechnete Verlustvolumen für den hier betrachteten Zeitraum beläuft sich auf 0,657 km³.

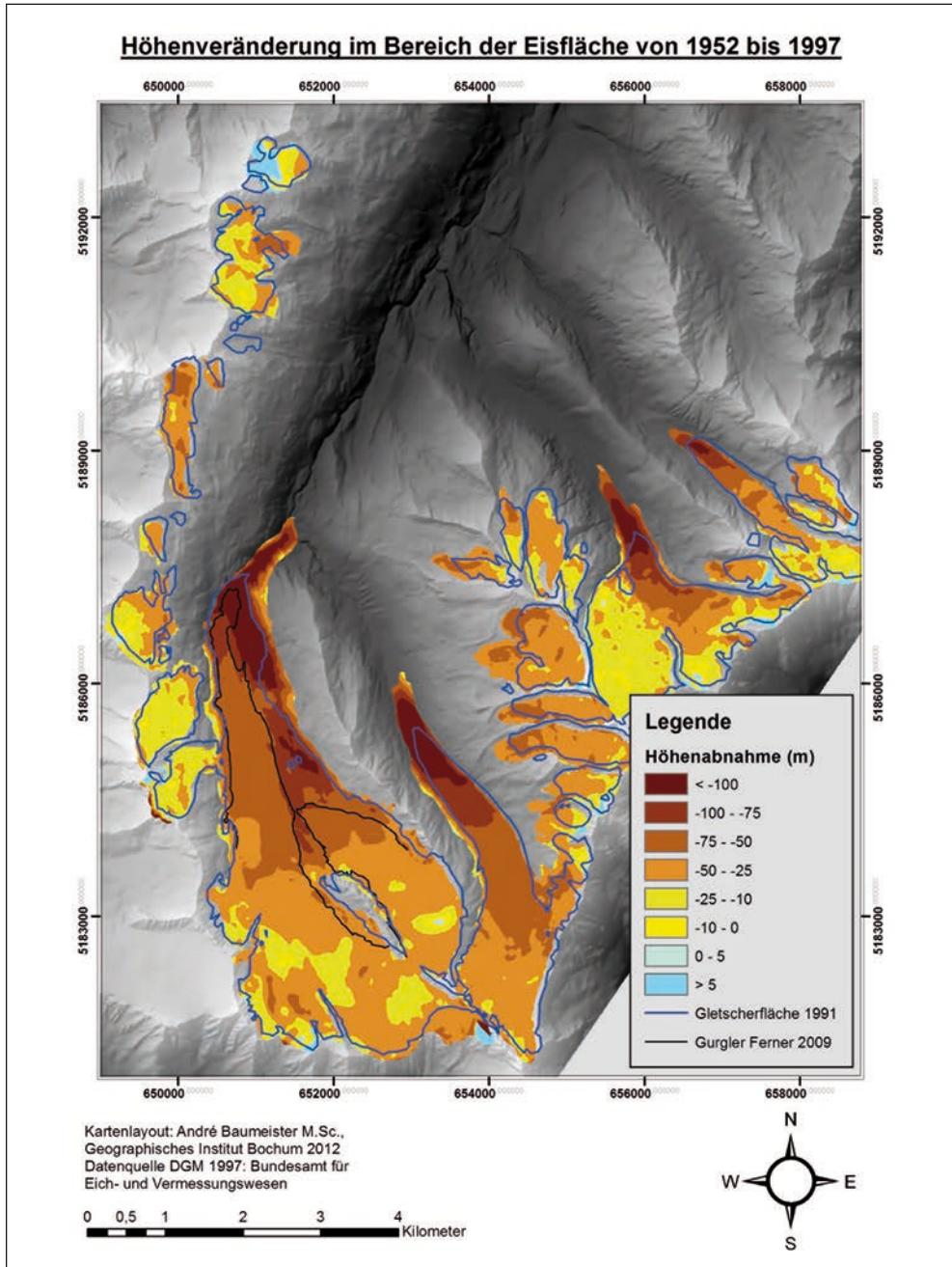


Abb. 7: Höhenabnahme der Gletscher im Einzugsgebiet der Gurgler Ache für den Zeitraum 1952-1997. Berechneter Eisvolumen-Verlust: 0,657 km³

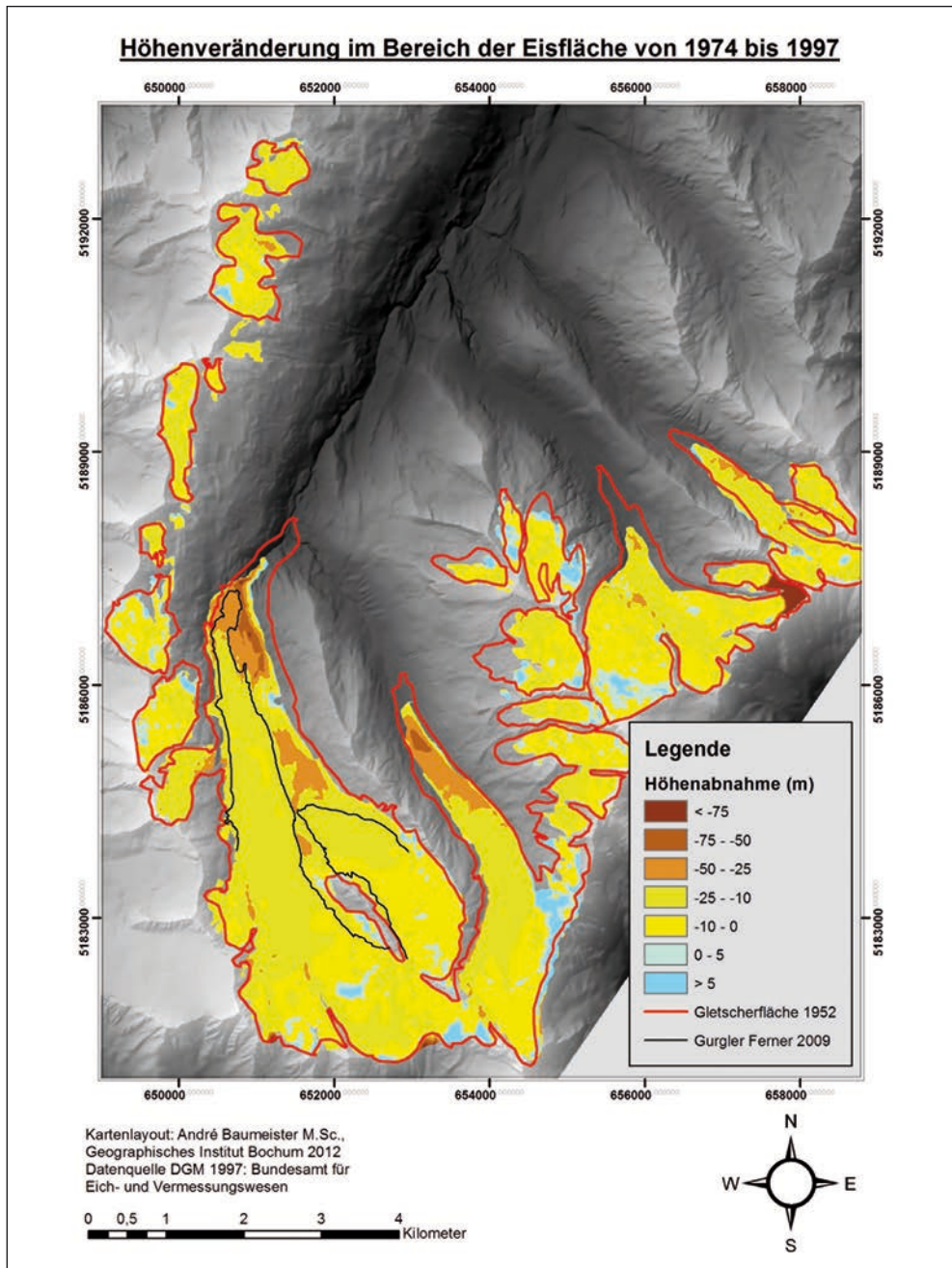


Abb. 8: Höhenabnahme der Gletscher im Einzugsgebiet der Gurgler Ache für den Zeitraum 1974-1997. Berechneter Eisvolumen-Verlust: 0,32 km³

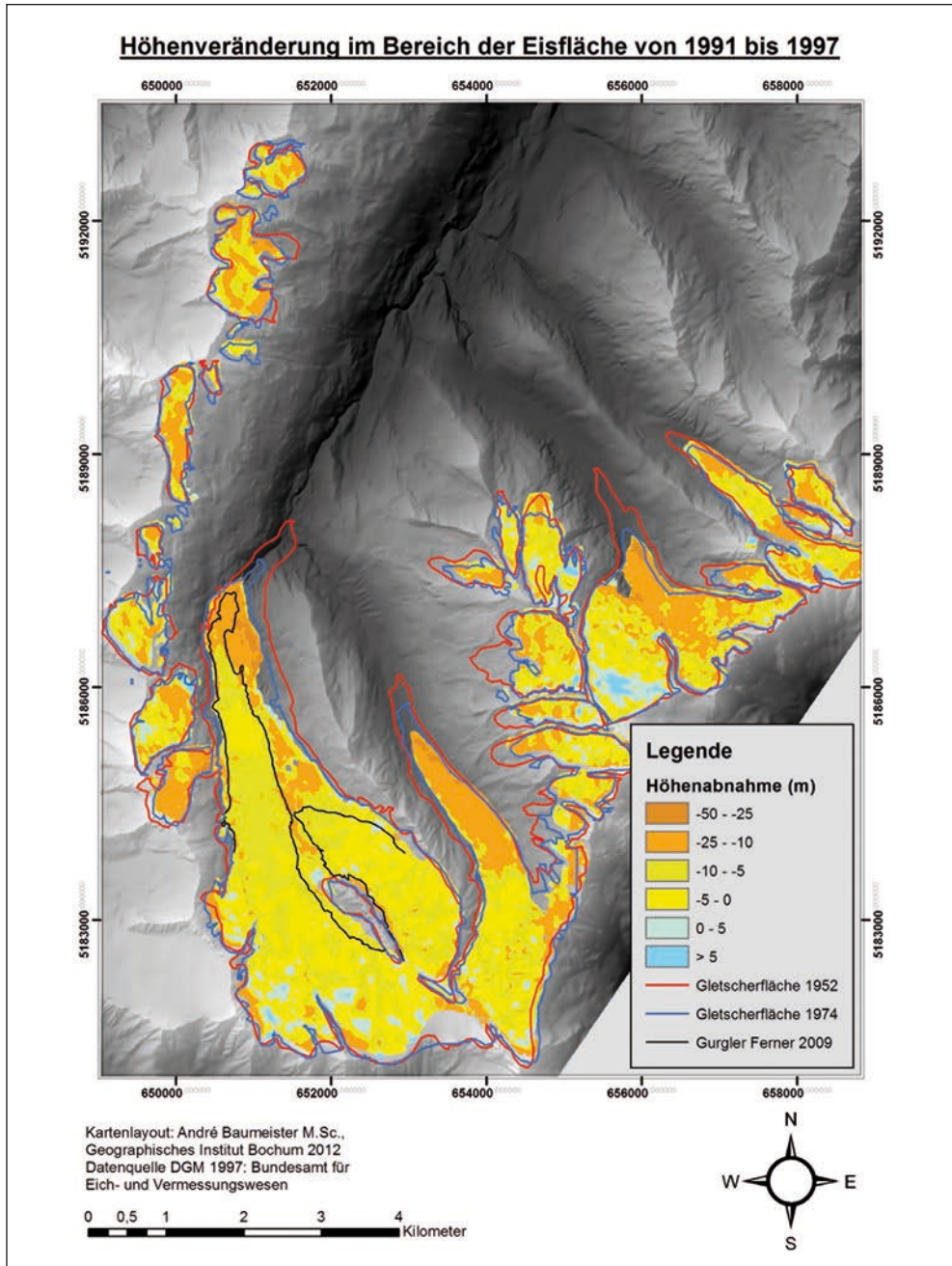


Abb. 9: Höhenabnahme der Gletscher im Einzugsgebiet der Gurgler Ache für den Zeitraum 1991-1997. Berechneter Eisvolumen-Verlust: 0,192 km³

Für den Zeitraum 1974-1997 (Abb. 8) zeigt sich ein ähnliches Bild, auch wenn die Höhenabnahmen deutlich geringer sind als für den vorher beschriebenen längeren Zeitraum. Die größten Abnahmen im Bereich zwischen 50 und > 75 m liegen ebenfalls auf den Gletscherzungen. Auch in dieser Auswertung sind Höhenzunahmen oder stark abweichende Höhenabnahmen, wie im Bereich zwischen Rotmoos- und Gaisbergferner, wahrscheinlich auf Interpolationsfehler zurückzuführen. Zunahmen der Gletscherhöhe, wie beispielsweise im oberen Bereich des Wasserfallferners lassen vielmehr darauf schließen, dass in diesen Bereichen die Mächtigkeit nur gering abgenommen hat. Es ist auffällig, dass sich Höhenzunahmen oft auf sehr steile Geländebereiche beschränken. Da in steilem Gelände horizontale Abweichungen der Höhenlinien zu großen Fehlern bei der Interpolation führen können, müssen Höhenzunahmen mit Vorsicht interpretiert werden. Zwischen 1974 und 1997 hat die Eismasse im Einzugsgebiet um $0,32 \text{ km}^3$ abgenommen.

Trotz des nur kurzen Zeitraums zwischen 1991 und 1997 (Abb. 9) zeigen sich auch hier Mächtigkeitsabnahmen von bis zu 50 m. Neben den Zungenbereichen der großen Talgletscher sind nun auch die hoch gelegenen Gletscher wie Ramolferner und Mannigebach Ferner betroffen. Berücksichtigt man die Ergebnisse des Zeitraumes 1952-1997, fällt auf, dass ein verhältnismäßig großer Anteil des Verlustes der Eismächtigkeit in den 7 Jahren zwischen 1991 und 1997 stattgefunden hat. Insgesamt hat sich das Eisvolumen im betrachteten Zeitraum um $0,192 \text{ km}^3$ verrin-

gert. Dies entspricht knapp 30 % der gesamten Volumenabnahme seit 1952, obwohl sich der Betrachtungszeitraum lediglich über 6 der insgesamt 45 Jahre erstreckt.

Auch wenn jährliche Schwankungen in den Betrachtungszeiträumen durchaus unterschiedlich ausfallen können, lässt eine Berechnung des jährlichen Eisverlustes einen besseren Vergleich der Ergebnisse zu. Hiernach belaufen sich die jährlichen Verluste zwischen 1952 und 1974 auf $14,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr. Zwischen 1974 und 1991 hat sich das Eisvolumen jährlich um $7,11 \times 10^6 \text{ m}^3$ verringert, während von 1991 bis 1997 der jährliche Eisverlust $27,42 \times 10^6 \text{ m}^3$ beträgt.

6. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen ein eindeutiges und kaum überraschendes Bild. Die Gletscher im Untersuchungsgebiet ziehen sich, mit Ausnahme kurzer Vorstoßphasen, kontinuierlich zurück. Diese Ergebnisse entsprechen einem weltweiten Trend (IPCC 2007), der für den Alpenraum durch zahlreiche Studien bestätigt werden kann (Lambrecht & Kuhn 2007, Braun & Weber 2008). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich dieser Trend im letzten Betrachtungszeitraum von 1991-1997 deutlich verstärkt hat. Auch diese Daten entsprechen weltweiten Beobachtungen (IPCC 2007). Im Fokus dieses Artikels stehen deshalb nicht aus den Ergebnissen ableitbare inhaltliche Aussagen über Gletscherstandsschwankungen,

sondern die einleitende Frage nach dem Potential historischer Karten Gletscherstandsschwankungen zu dokumentieren.

In wohl keinem Gebirge der Welt wurden bestehende Karten so häufig aktualisiert wie in den Alpen. Die gute Dokumentation und Transparenz des Tiroler Landesarchivs, des Alpenvereins und letztendlich des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen sind die Grundlage für die Auswahl geeigneter Karten. Die Qualität der erzeugten Daten kann nur über ein detailliertes Hintergrundwissen zur Entstehung des jeweiligen Kartenblatts gewährleistet werden. Für eine reine Rekonstruktion der Gletscherfläche genügen Informationen zum Aufnahmejahr. Für die Erstellung von Höhenmodellen ist zudem die Art der Aufnahme von Relevanz. Neuauflagen, in denen lediglich die Gletscherfläche korrigiert wurde, sind für das geodätische Verfahren ungeeignet. Geeignet sind in diesem Fall nur Neuaufnahmen, die aus photogrammetrisch ausgewerteten Luftbildern erzeugt wurden. Trotz dieser strengen Kriterien konnten für diese Arbeit zahlreiche Karten ausgewählt und bearbeitet werden.

Die Lagegenauigkeit amtlicher topographischer Karten wird in Österreich nach Aussage der Herausgeber lediglich durch die Signaturen eingeschränkt. Im Kartographischen Modell 1:50.000 (KM50-R) beträgt die Zeichengenauigkeit 0,1 mm, das entspricht 5 m in der Natur. Die Lagegenauigkeit in den verwendeten Luftbildern ist von der Qualität der Georeferenzierung abhängig. Hier wurde während der Bearbeitung die geringmögliche Abweichung angestrebt. Der Höhenfehler

des aus Befliegungen abgeleiteten DGM wird nach Aussagen des BEV für Siedlungsgebiete mit ± 1 m und für Gletscher und Ödland mit ± 5 m angegeben. Für Isolinien auf Karten, die aus Luftbildern erzeugt wurden, gilt eine vergleichbare Genauigkeit. Die Genauigkeit von Höhenangaben auf den älteren topographischen Karten wurde im Rahmen dieser Arbeit stichprobenartig geprüft. Die Höheninformationen auf den Isolinien der historischen Karten wurden mit den Höhenangaben des aktuellen DGMs verglichen. Die Abweichungen lagen auf dem gesamten Kartenblatt (mit Ausnahme der Gletscherflächen) in der Regel im Bereich von ± 5 m. Der Fehler wird tendenziell mit zunehmender Hangneigung größer, so dass in steileren Felsflanken auch größere Abweichungen festgestellt wurden. Um genauere Aussagen zum möglichen Messfehler des Verfahrens im Untersuchungsgebiet treffen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierzu muss ein Fehler für jeweils unterschiedliche Hangneigungsklassen berechnet und der Anteil des Untersuchungsgebietes in der entsprechenden Klasse berücksichtigt werden.

Mögliche Ungenauigkeiten im Interpolationsverfahren sind abhängig von der Genauigkeit der Digitalisierung der Höhenlinien und den Ergebnissen des gewählten Interpolations-Algorithmus. Hierzu wurden ebenfalls Testgebiete außerhalb der Gletscherflächen historischer Karten ausgewählt und nach dem beschriebenen Verfahren bearbeitet. Auf diesem Wege konnte die Abweichung interpolierter historischer Höhenmodelle vom DGM 1997 geprüft werden. Wie auch bei der Über-

prüfung der Isolinen lag die Abweichung im Bereich von ± 5 m und zeigte eine steigende Tendenz in steileren Geländebereichen.

Für Gletscherflächen ergeben sich zusätzliche Ungenauigkeiten in den Bereichen oberhalb der Firngrenzen. Die meist weißen Flächen können auf Luftbildern nur schwer photogrammetrisch ausgewertet werden, weshalb die Abweichung der angegebenen Geländehöhe größer sein kann (Fischer 2011). Gspurning et al. (2004) nennen zusätzlich die Abgrenzung der Gletscherfläche als weitere Fehlerquelle, wobei dieser Fehler im hier betrachteten Untersuchungsgebiet aufgrund der Gesamtgröße der Gletscherfläche zu vernachlässigen ist. Mögliche Fehler bei der geodätischen Methode werden also maßgeblich durch die Qualität des Ausgangsmaterials bestimmt. Hier spielt

vor allem auch die Zellgröße der Rasterdaten eine Rolle. Während Gspurning et al. (2004) mit einer Zellgröße von 25×25 m arbeiten, werden in den meisten Arbeiten Geländemodelle mit einer Auflösung von ≤ 10 m verwendet. Abermann et al. (2009) geben den Bilanzfehler der geodätischen Methode für Gletscher $> 1 \text{ km}^2$ mit $\pm 1,5 \%$ und für kleinere Gletscher mit $\pm 5 \%$ an. Fischer (2011) vergleicht in ihrer Arbeit die geodätische mit der direkten glaziologischen Methode und stellt ebenfalls heraus, dass die Beschaffenheit des Gletschers maßgeblich die Größe der Abweichung bestimmt. Die Anwendung der geodätischen Methode unter Verwendung historischer Karten wird in keinem der genannten Artikel in Frage gestellt.



Abb. 10: Der Gurgler Ferner im Jahr 2008 (Foto: André Baumeister)

Eine zusätzliche Sicherheit über die Plausibilität der Ergebnisse liefert der Vergleich mit den Daten der Arbeit von Kuhn et al. (2009). Hier wurde über das geodätische Verfahren die Höhenveränderung des Gurgler Ferners zwischen 1969 und 1997 berechnet. Die Ergebnisse sind mit den in dieser Arbeit gewonnenen Daten vergleichbar. Auch die in den Ergebnissen beschriebenen Prozesse am Gurgler Ferner finden sich in dieser Arbeit wieder. Abb. 10 zeigt ein Foto vom vorderen Bereich des Gurgler Ferners. Gut zu erkennen sind die Seitenmoräne von 1850 und der ausgeprägte Gletscherschliff. Die hierdurch erkennbare ehemalige Ausdehnung des Gletschers und die Morphologie der Gletscherschlucht bestätigen die berechneten großen Höhenabnahmen im Bereich der Gletscherzunge.

Abb. 11 zeigt den Trend der Niederschlags- und Abflussdaten im Untersuchungsgebiet. Der Trend der Abflusshöhe ist deutlich stärker ausgeprägt als der Trend des jährlichen Nie-

derschlags, was auf den zusätzlichen Schmelzwassereintrag durch die negativen Massenbilanzen der Gletscher zurückzuführen ist. Für den Zeitraum zwischen 1976 bis 1997 wurde hieraus ein zusätzlicher Schmelzwassereintrag von ca. $0,3 \text{ km}^3$ geschätzt. Für den gleichen Zeitraum wurde über das geodätische Verfahren eine Abnahme des Eisvolumens von $0,32 \text{ km}^3$ berechnet. Berücksichtigt man die geringere Dichte des Eises mit einem Faktor von 0,85 (Fischer 2011), ergibt dies einen zusätzlichen Schmelzwassereintrag von $0,27 \text{ km}^3$.

7. Schlussfolgerung

Historische Karten bieten eine kostengünstige und durchaus geeignete Möglichkeit die Entwicklung von Gletschern in Hinblick auf Fläche und Volumen zu rekonstruieren. Die

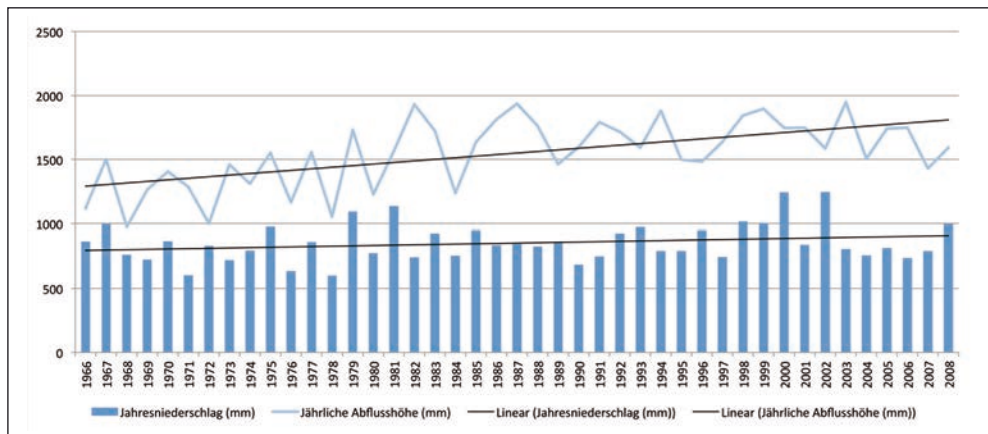


Abb. 11: Darstellung des jährlichen Niederschlags und der jährlichen Abflusshöhe in Obergurgl von 1966 bis 2008 (Datenquelle: Niederschlag – Hydrographischer Dienst Österreich, Abflussdaten – www.lebensministerium.at)

zeitliche Auflösung von bestehenden Inventaren kann so deutlich verbessert werden. Die Plausibilität der in dieser Arbeit gewonnenen Daten und die Anwendung der geodätischen Methode unter Verwendung historischen Kartenmaterials bestätigen diese Aussage. Die Möglichkeiten hierzu werden in erster Linie durch die Qualität des Kartenmaterials vorgegeben. Unerlässlich sind Informationen über Aufnahmejahr, Art der Aufnahme und Aktualisierung. Das Fehlerpotential in der weiteren Bearbeitung der Eingangsdaten (Georeferenzierung, Digitalisierung, Interpolation) ist bei gründlicher Bearbeitung verhältnismäßig gering. Im Untersuchungsgebiet eignen sich hierzu in erster Linie die aerophotogrammetrisch ausgewerteten Luftbilder seit ca. 1950. Zur Dokumentation der flächenhaften Veränderung eignen sich zudem auch terrestrisch aufgenommene Karten, die Gletscherstände seit Ende des 19. Jahrhunderts darstellen. Ältere Karten sind für die Fragestellung in dieser Arbeit nicht geeignet.

Während die Ergebnisse der Flächenrekonstruktion nur wenig Diskussionsbedarf liefern, ist das Potential der durch das geodätische Verfahren erzeugten Daten ganz von der Fragestellung abhängig. Die Größe des Gletschers, Inklinations und die gewünschte zeitliche Auflösung spielen hierbei eine wichtige Rolle. Die Genauigkeit der Ergebnisse nimmt mit geringerer Gletschergröße, größerer Geländeneigung und kürzerer zeitlicher Auflösung tendenziell ab, während die Rekonstruktion großer Gletscherflächen in ganzen Einzugsgebieten über längere Zeiträume sehr plausible Daten liefert.

Literatur

- Deutscher Alpenverein (2009) Alpenvereinskarten Digital. München.
- Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A. & Kuhn, M. (2009) Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). *The Cryosphere*, 3: 205–215.
- Anich, P. & Hueber, B. (1774) *Atlas Tyrolensis*. Wien.
- Beimrohr, W. (2012) Die Erste und die Zweite Landesaufnahme von Tirol. URL: http://www.tirol.gv.at/fileadmin/www.tirol.gv.at/themen/kultur/landesarchiv/downloads/Erste_Zweite_Landesaufnahme-Tirol.pdf.
- Braun, L. N., Escher-Vetter, H., Siebers, M. & Weber, M. (2007) Water Balance of the highly Glaciated Vernagt Basin, Ötztal Alps. In: *The water balance of the alps: What do we need to protect the water resources of the Alps? Proceedings of the conference held at Innsbruck university, 28-29 September 2006*, Psenner, R. (Hg.) Innsbruck University Press, Innsbruck, S. 33–42.
- Braun, L. & Weber, M. (2008) Gletscher - Wasserkreislauf und Wasserspende. In: *Klimawandel in den Alpen: Fakten – Folgen – Anpassung*, BMU-Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, S. 48–55.
- Brodersen, K. (1995) *Terra cognita. Studien zur römischen Raumerfassung*. G. Olms Verlag, Hildesheim/New York

- Esri (2013) ArcGIS Resource Center. URL: <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/00r90000001n000000/>.
- Fasching, G. L. (2000) Die Österreichischen Militärkartenwerke. Planungen, Entwicklungen und Realisierungen seit 1955. In: PER ASPERA AD ASTRA, Gartner, G. & Lechthaler, M. (Hg.), Eigenverlag des Instituts für Kartographie und Reproduktionstechnik, Wien, S. 175-189.
- Fischer, A. (2011) Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere* 5: 107–124.
- Groß, G. (1987) Der Flächenverlust der Gletscher in Österreich 1850-1920-1969. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie* 23: 131–141.
- Gspurning, J., Tintor, W., Tribuser, M. & Wankonigg, H. (2004) Volumen- und Flächenänderung an der Pasterze von 1981 bis 2000. *Carinthia II* 114: 463–472.
- Hydrographischer Dienst in Österreich (2009) *Hydrographisches Jahrbuch von Österreich*. Wien.
- IPCC (2007) *Climate change 2007. The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1. Aufl. UNEP, New York.
- Klaus, R. & Baumeister, A. (2012) GIS-basierte Verlustvolumenbestimmung von Gletschern anhand historischer Karten. *geoLoge* (1): 3–13.
- Kuhn, M., Lambrecht, A., Abermann, J., Patzelt, G. & Groß, G. (2009) Projektbericht 10. Die österreichischen Gletscher 1998 und 1969, Flächen- und Volumenveränderungen, Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- 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.
- Patzelt, G. (1982) *Gurgler Ferner 1981*. Institut für Hochgebirgsforschung. Universität Innsbruck.
- Psenner, R. (2007) The water balance of the alps. What do we need to protect the water resources of the Alps? *Proceedings of the conference held at Innsbruck university, 28-29 September 2006*. Innsbruck University Press, Innsbruck.
- Reinhardt, W. & Rentsch, H. (1986) Determination of changes in volume and elevation of glaciers using Digital Elevation Models für the Vernagtferner, Ötztal Alps, Austria. *Annals of Glaciology* (8): 151–155.
- tiris Kartendienste (2013) URL: <http://mo.tirol.gv.at/scripts/esrimap.dll?Name=anich&Cmd=Start>, zuletzt geprüft am: 11.02.2013.
- Veit, H. (2002) *Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. Ulmer, Stuttgart.

Verzeichnis des Autors

André Baumeister
Angewandte Physische Geographie
Universität Bochum
Universitätsstraße 150, D-44780 Bochum
andre.baumeister@rub.de