

Dendrochronologische Auswertung fossiler Hölzer zur Rekonstruktion der nacheiszeitlichen Gletschergeschichte

Autor(en): **Holzhauser, Hanspeter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **13 (2008)**

Heft 2

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-226682>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Dendrochronologische Auswertung fossiler Hölzer zur Rekonstruktion der nacheiszeitlichen Gletschergeschichte

Hanspeter Holzhauser¹

Ergänzender Beitrag zur Jahresversammlung der VSP/ASP, Sion, Juni 2008.

Dieser Artikel ist ein Nachdruck aus der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, Heft 1, Jahrgang 153, 2002 (aktualisiert).

Stichworte: Holozäne Gletscherlängenänderungen, Klimageschichte, Dendrochronologie

Zusammenfassung

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts stiessen die Alpengletscher zu ihrem letzten Hochstand innerhalb der Nacheiszeit (letzte rund 11'600 Jahre, auch Postglazial oder Holozän genannt) vor. Einzelne von ihnen drangen tief in die Nadelwaldstufe ein und warfen zahlreiche Bäume um. Nicht nur Wald wurde zerstört, sondern auch wertvolles Kulturland, Alpwirtschaftsgebäude und Behausungen, wie beispielsweise am Grossen Aletsch- und am Gornergletscher. Während der anschliessenden und heute noch andauernden Schwundphase kamen und kommen immer wieder Reste von Bäumen zum Vorschein, die der Gletscher einstmals unter sich begraben hat. Teilweise können die Baumteile noch am ursprünglichen Wuchsort (in situ) vorgefunden werden. Vielfach datieren diese Hölzer nicht nur aus der Zeit der letzten Vorstossphase, sondern können hunderte bis tausende von Jahren alt sein, denn innerhalb des Postglazials haben sich ähnliche Vorstoss- und Schwundphasen mehrmals ereignet. Im vorliegenden Artikel wird gezeigt, welche Merkmale solche Holzfunde häufig aufweisen und wie diese Baumreste gletschergeschichtlich ausgewertet werden können. Anhand des Gornergletschers und des Grossen Aletschgletschers wird exemplarisch gezeigt, wie mit Hilfe dendrochronologisch absolut datierter Hölzer die exakte Rekonstruktion der Gletscherlängenänderung möglich ist. Die Vorstossbeträge bewegen sich im Falle des Gornergletschers zwischen 7-8 und 20 m pro Jahr, im Falle des Grossen Aletschgletschers zwischen 7-8 und 36 m pro Jahr.

Abstract

Around the middle of the 19th century, alpine glaciers advanced to their last maximum extension within the Holocene (the last 11'600 years). Some of the glaciers, especially the Great Aletsch and Gorner, penetrated deeply into wooded land and destroyed numerous trees. Not only were trees destroyed but also valuable arable farmland, alpine farm buildings and dwelling houses. Since the last maximum extension in the 19th century the retreat of the glaciers has accelerated revealing, within the glacier forefields, the remainders of trees once buried. Some of this fossil wood is found in the place where it grew (in situ). Often the wood dates back to a time before the last glacier advance, most of it is several thousands of years old because glacial advance and retreat periods occurred repeatedly within the Holocene. This paper shows the characteristics of fossil wood and how it can be analysed to reconstruct glacial history. It will be demonstrated how glacier length variation can be exactly reconstructed with help of dendrochronology. Thanks to the very exact reconstruction of the glacier length change during the advance periods in the 14th and 16th centuries, the velocities of both the Gorner and Great Aletsch glaciers can be estimated. They range between 7-8 and 20 m per year, in the case of the Gorner glacier, and between 7-8 and 36 m per year, in the case of the Great Aletsch glacier.

¹ Ahornstrasse 38, 8051 Zürich, h.holzhauser@bluewin.ch

1. Einleitung

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts stiessen die Alpengletscher nochmals kräftig vor und erreichten ihren letzten Hochstand innerhalb der «Kleinen Eiszeit»^{1]}. Hinweise über vorstossende Gletscher, die um 1850^{2]} in bewaldetes Gebiet eindringen, Bäume umdrücken und anschliessend überfahren, sind nicht nur zeitgenössischen Bildquellen (Fig. 1), sondern auch Schriftquellen zu entnehmen (u. a. Collomb 1849). Die Schäden, die durch vorrückende Gletscher angerichtet wurden, waren stellenweise beträchtlich. Dies geht aus einem Brief an den Walliser Staatsrat hervor, der am 10. Januar 1853 von Förster J. Thenisch verfasst wurde und die Situation am Zungenende des Grossen Aletschgletschers schildert (Archiv Sion, DTP 47): «In drei aufeinander folgenden letztverflossenen Jahren hatten die Unterfertigten als dahin geschickten Waldcommissäre die Gelegenheit zu bemerken, dass jährlich eine Menge der schönsten Pflanzen von dem gegen die Bideimijbrücke rasch heranrückenden Gletscher auf eine solche Art zerstört wurde, dass nicht der geringste Gebrauch mehr davon gemacht werden konnte. Da der riesenhafte Aletschgletscher jedenfalls mit Riesenschritten durch den engen Tobel vorwärts rücken wird, und da dieser Tobel am linken und rechten Ufer der Massa dicht mit Bäumen besetzt ist, so laufen bei 2000 Pflanzen Gefahr zu Grunde zu gehen, um diesem Übel vorzubeugen, ersuchen daher die interessierten Gemeinden das hohe Departement es möge ihm gütigst die Erlaubniss ertheilt werden 2000 Pflanzen am genannten Orte ausbeuten zu dürfen; ...». Durch das allgemein kräftige Vorrücken der Alpengletscher wurden neben bewaldetem Gebiet auch landwirtschaftlich genutzte Flächen wie Äcker und Alpweiden in Mitleidenenschaft gezogen und mit Eis und Schutt bedeckt. An einzelnen Orten, wie beispielsweise am Grossen Aletsch- und am Gornergletscher, fielen sogar Wohn- und Alpgebäude, einst in vermeintlich sicherer Entfernung

vom Eisrand errichtet, den vordrängenden Eismassen zum Opfer (Holzhauser 1984a, 1995).

Gletscher hinterlassen bei Hochständen im Gelände Spuren in Form von Moränenwällen, die leicht zu lokalisieren sind. Auch während des letzten Hochstandes im 19. Jahrhundert wurde bei den meisten Gletschern ein ausgeprägter Wall abgelagert, der infolge spärlicher Vegetationsbedeckung und wenig fortgeschrittener Bodenbildung gut erkennbar ist. Dieser sogenannte «1850er»-Wall umreisst gleichsam die Dimension der Gletscherhochstände innerhalb der letzten rund 11'600 Jahre, der Nacheiszeit (auch Postglazial oder Holozän genannt).

Zwischen dem «1850er»-Wall und dem heuti-

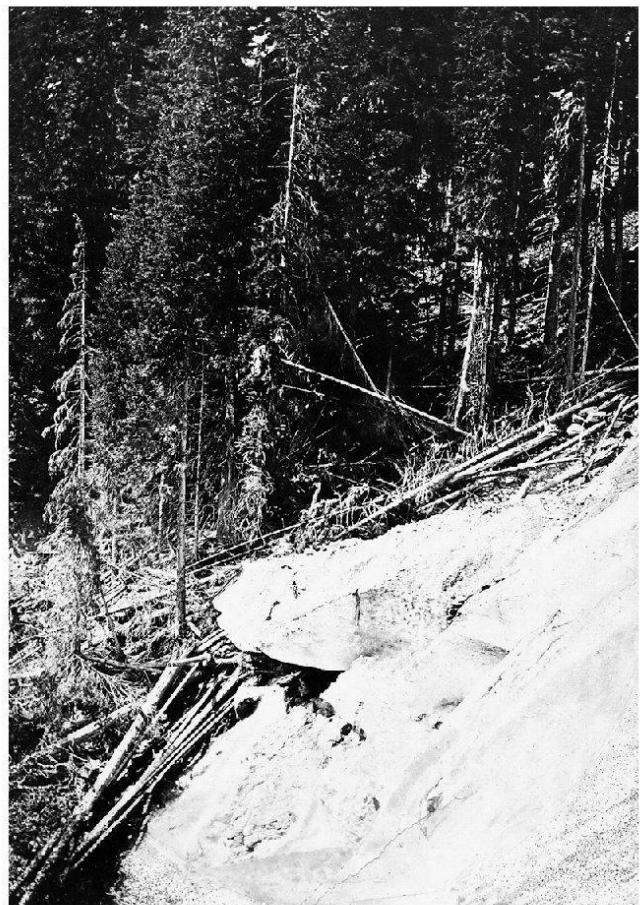


Fig. 1: Der Grosse Aletschgletscher stösst in den Wald vor. Aufnahme von Camille Bernabé, 6. September 1850 [Archiv der Gletscherkommission Schweiz].

gen Eisrand ist durch den massiven Schwund der Alpengletscher in den letzten rund 140 Jahren Neuland freigelegt worden, das als Gletschervorfeld bezeichnet wird (Fig. 2 und 3).

Bei hochgelegenen Gletschervorfeldern sind heute kaum bis wenig Spuren einer Vegetationsentwicklung nachweisbar; bei tief liegenden Gletschervorfeldern hingegen ist die Pflanzensukzession bereits stark fortgeschritten, und Bäume wie Lärchen (*Larix decidua* Mill.) und Arven (*Pinus cembra*) haben sich vorab im mittleren bis randlichen Bereich des Vorfeldes wieder flächenhaft angesiedelt (Fig. 3). Solche Wiederbesiedlungsphasen im Anschluss an kühlere Klimaabschnitte mit Gletschervorstössen sind im Verlaufe des Postglazials mehrmals erfolgt (Fig. 4). Dies bezeugen organische

Reste unterschiedlichen Alters, die in zahlreichen Gletschervorfeldern immer wieder gefunden werden, nämlich überschüttete Böden und Torflagen sowie Teile von umgedrückten Bäumen (Wurzeln, Äste und Stammstücke). In diesem Zusammenhang spricht man von fossilen Böden und fossilen Bäumen oder Hölzern. Auch vom Menschen hinterlassene Spuren wie die Pfeilbogen vom Lötschenpass (ca. 1800 - ca. 2200 v. Chr., Bellwald 1992) sowie der berühmte «Ötzi» vom Hauslabjoch (ca. 3200 v. Chr.; Spindler et al. 1995) sind Hinweise auf einstmals geschrumpfte Gletscher.

Um den «Jahrhundert-Schwund» der Alpengletscher seit 1850/60 klimatisch richtig zu deuten muss bekannt sein, innerhalb welcher Bandbreite die Gletscher sich im Postglazial bewegt haben. Diese Bandbreite

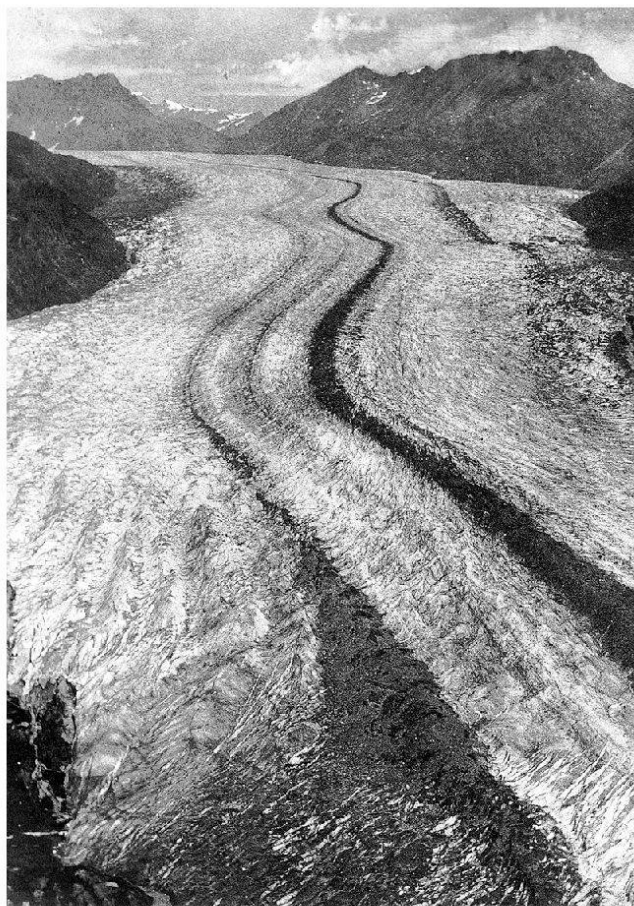


Fig. 2: Blick von der Belalp auf den Grossen Aletschgletscher um 1856 [Aufnahme: Frédéric Martens, Alpine Club Library, London].

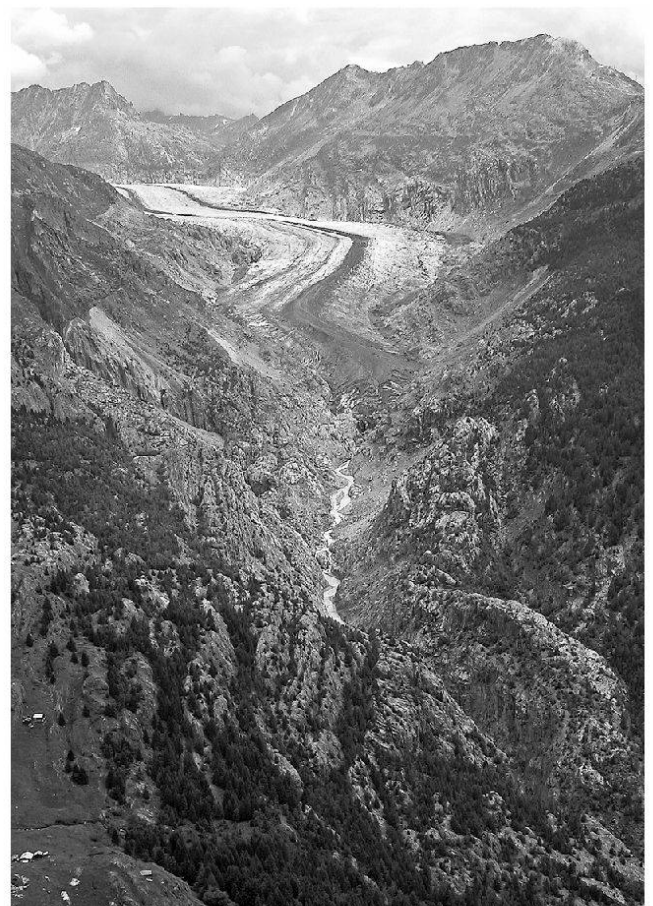


Fig. 3: Der Grosse Aletschgletscher am 27. Juli 2008 vom gleichen Standort aufgenommen wie Fig. 2. Der «1850er»-Wall hebt sich auf der rechten Talseite als helle Linie über eine kurze Strecke vom dunklen Talhang ab [Aufnahme: H. Holzhauser].

widerspiegelt die natürliche Variabilität des vorindustriellen Klimas, denn Gletscher sind erwiesenermassen Klimazeiger und spielen in der Diskussion um die befürchtete, vom Menschen in zunehmendem Masse beschleunigte Erwärmung des globalen Klimas (verstärkter «Treibhauseffekt») eine zentrale Rolle. Ihre Bedeutung im Rahmen

der Klimaforschung zeigt sich darin, dass die Gletscher im Bericht des Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC 1995) als Klimaindikatoren höchster Signifikanz eingestuft werden und somit Schlüsselindikatoren des Klimasystems darstellen (Haeberli 1994). Im Zentrum des Interesses stehen heute Fra-

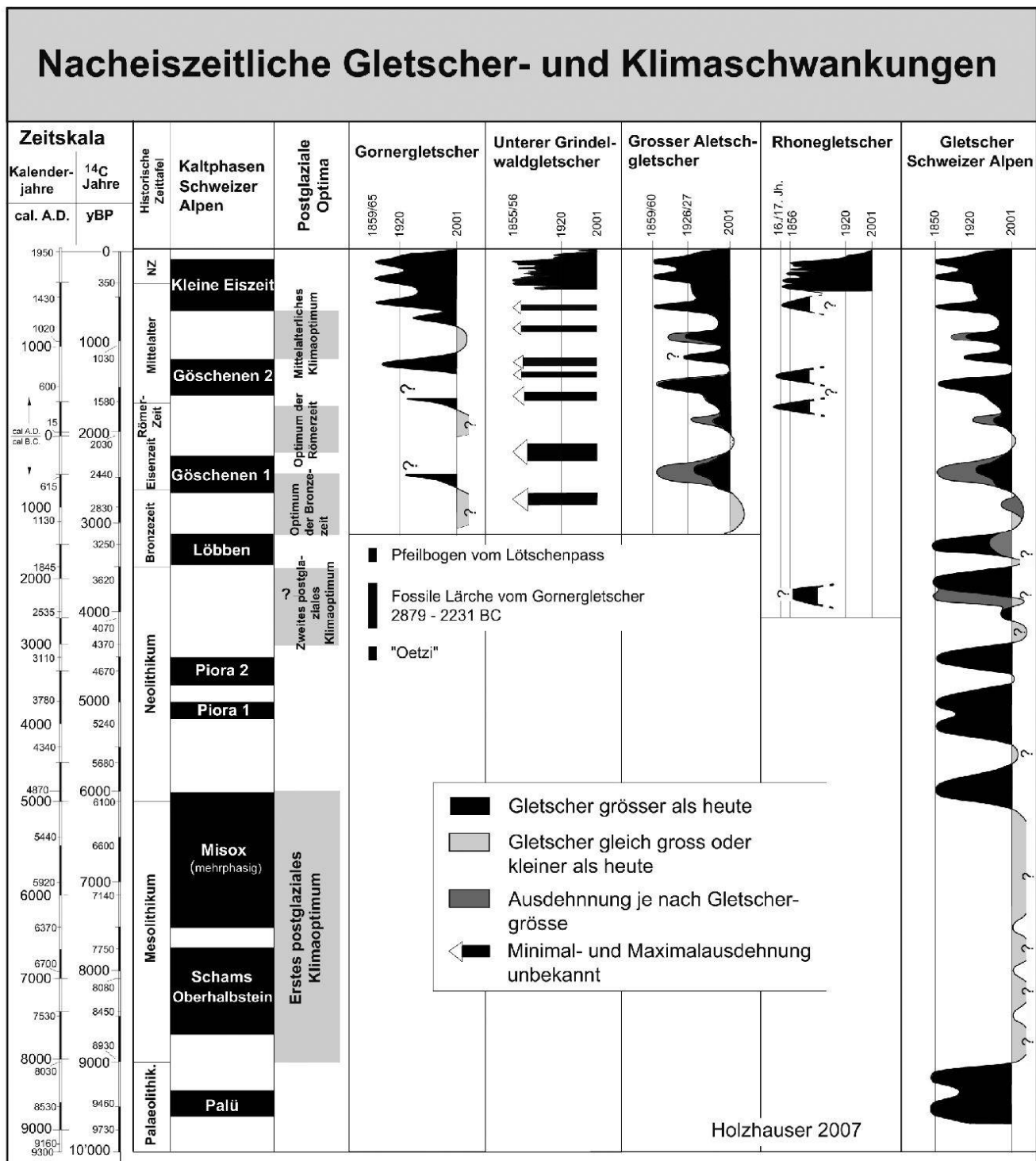


Fig. 4: Vorstoss- und Rückschmelzphasen der Alpengletscher wechselten sich in unregelmässigen Abständen innerhalb der Nacheiszeit ab.

gen wie: Waren die Gletscher früher bereits einmal so klein wie heute, oder waren sie vielleicht sogar einmal kleiner? Ist die heutige Gletscherausdehnung verglichen mit früheren Ausdehnungen als ungewöhnlich einzustufen und folglich bereits ein alarmierendes verstärktes «Treibhaussignal»? Sind wir bereits an der «wärmeren» Grenze postglazialer Klimaverhältnisse angelangt oder haben wir diese, selbstverschuldet, bereits überschritten?

Antworten auf diese Fragen zu finden ist Aufgabe der Gletschergeschichte, die mit unterschiedlichen Methoden versucht, die Gletscherlängenänderungen innerhalb der Nacheiszeit zu rekonstruieren (siehe Zumbühl & Holzhauser 1988). Eine dieser Methoden ist das Auswerten von fossilen Bäumen aus Gletschervorfeldern.

2. Fossile Bäume aus Gletschervorfeldern

Die Dimension der maximalen nacheiszeitlichen Ausdehnung der Alpengletscher ist, wie eingangs erwähnt, aufgrund der Hochstandswälle bestens bekannt. Eine minimale Gletscherausdehnung, d. h. die geringste Ausdehnung zwischen zwei Vorstossphasen, ist hingegen nicht durch Moränenwälle dokumentiert. Sie lässt sich nur mit der Datierung von fossilen Böden und Bäumen, die heute am abschmelzenden Eisrand zum Vorschein kommen, nachweisen, wie dies zum Beispiel am Grossen Aletsch- und am Gornergletscher der Fall ist (Holzhauser 1995). Mit der dendrochronologischen Analyse der fossilen Bäume aus Gletschervorfeldern besteht zudem die einmalige Möglichkeit, frühere Gletschervorstoss- und Gletscherschwundphasen sowohl zeitlich als auch in ihrem räumlichen Ausmass äusserst genau zu erfassen (Holzhauser 1984a, 1984b, 1995; Furrer & Holzhauser 1984, Nicolussi & Patzelt 1996, Holzhauser & Zumbühl 1996, 1999a; Luckman 1993, 1995). Die sogenannte Dendroglaziologie ist neben anderen paläo-

klimatologischen Analysemethoden (u. a. Pollenanalyse, Analyse von Eisbohrkernen und Seesedimenten) für die Rekonstruktion der nacheiszeitlichen Klimageschichte von grosser Bedeutung.

2.1 Lage

Sowohl in den steilen Ufermoränen, in Endmoränenwällen als auch innerhalb des Vorfeldes sind fossile Reste von Bäumen wie Wurzeln, Äste und Stammstücke zu finden. Häufig sind fest verankerte Wurzelstöcke oder Strünke an geschützten Lagen wie zum Beispiel im Bereich grosser Felskörper erhalten geblieben (Fig. 5). Der Gletscher vermochte in diesem Falle nur die den Fels überragenden Baumteile wegzudrücken (Holzhauser 1984a). An solchen Baumrelik-



Fig. 5: Fossiler Lärchenstrunk in situ [Gor 15] im Schutze zweier grosser Felsblöcke. Der stark aufgesplitterte Strunk weist am Stammansatz noch Teile der Rinde auf. Radiokarbonalter: 785 ± 75 yBP [UZ-1545]; Dendroalter: 950-1186.

ten sind meistens noch Teile der Rinde vorhanden. Oftmals aber überdauerten nurmehr in Felsritzen eingewachsene Wurzelteile (Holzhauser 1995).

Vielfach aber wurden die Bäume vom vorstossenden Gletscher entwurzelt, vom Gletscher selber oder vom Gletscherbach wegtransportiert und anschliessend eingesedimentiert. Oftmals liegen die Baumreste unter einer meterdicken Moränendecke vergraben und können nur durch künstliche Aufschlüsse oder durch einen erodierenden Gletscherbach freigelegt werden. Am Zungenende des Gornergletschers konnten in den letzten drei Jahren vom Autor zahlreiche vom Gletscherbach ausgeschwemmte Stamm- und Wurzelstücke gefunden und datiert werden. Ihre Radiokarbonalter streuen zwischen 2200 und 8800 yBP^{3]} und bezeugen minimale Gletscherausdehnungen.

Bäume, die den Kamm oder die Aussenseite einer Ufermoräne besiedelten, wurden vom Moränenschutt des vorstossenden Gletschers zugedeckt und erodieren heute in verschiedenen Höhenlagen im Ufermoränenprofil allmählich wieder heraus. Solche Hölzer, die häufig in einen fossilen Bodenhorizont eingebettet sind, dokumentieren in der Regel Gletscherhochstände (Röthlisberger 1976, Schneebeil 1976, Bless 1984, Holzhauser & Zumbühl 1996).

2.2 Merkmale

Fossiles Holz aus Gletschervorfeldern weist charakteristische Merkmale auf, die auf eine direkte mechanische Einwirkung des Gletschers zurückzuführen sind. Als auffälliges äusseres Merkmal sind Schliffspuren an Stämmen und Wurzelstöcken zu nennen, die von der schleifenden Wirkung der im Eis eingefrorenen Gesteinspartikel herrühren. Im Gletscherbett umgelagerte und vom Gletscherbach transportierte Stämme oder Stammstücke weisen nur noch die Astansätze auf; von der Rinde sind keinerlei oder nur noch spärliche Spuren vorhanden.

Durch den Auflagedruck des Gletschers wur-

den vereinzelte Stämme stark gepresst, so dass der Querschnitt eines ursprünglich rund gewachsenen Stammes eine elliptische Form angenommen hat. Dabei sind oftmals periphere Risse im Holz entstanden, die mit feinem Sand oder siltigem Material aufgefüllt sein können. Vereinzelt sind auch kleinere Steinchen in die Stammoberfläche gedrückt worden. Die starke Pressung durch den Gletscher zeigt sich auch im Jahrringbild. Die Frühholzzellen können leicht bis stark zusammengequetscht sein, die Spätholzzellen hingegen sind in der Regel vom Druck nicht betroffen (Röthlisberger 1976). Je nach Stärke des Druckes und der Beschaffenheit des Holzes sind nur die äussersten 10 bis 20 Jahrringe betroffen. Es kann aber vorkommen, dass sich der Druck bis zum Mark hin auswirkte (Fig. 6). An manchen Stämmen hat die Eislast die Struktur der äussersten Jahrringe unkenntlich gemacht, was eine dendrochronologische Analyse verunmöglicht.

Ein weiteres, häufig zu beobachtendes Merkmal an Bäumen, die einem Gletschervorstoss zum Opfer fielen, ist eine abrupt einsetzende Verengung der peripheren Jahrringe. An mechanisch vom Gletscher ungeschädigten Stämmen ist dieser Wechsel von relativ breiten zu sehr engen Jahrringen gut sichtbar (Fig. 7). Diese sehr schmalen Jahrringe, die in extremen Fällen nurmehr eine bis wenige Zellenreihen umfassen können, sind Zeichen dafür, dass der Gletscher in die unmittelbare Nähe des Baumes vorgerückt ist und die lokalklimatischen Bedingungen durch den kühlenden Gletscherwind verändert hat (Oeschger & Röthlisberger 1961, Holzhauser 1984b, Kaiser 1993).

Durch die plötzliche Abkühlung kann die kambiale Aktivität am Stammfuss stark reduziert oder ganz eingestellt werden; der Baum bildet dann nur in grösserer Stammhöhe noch Jahrringe aus (Kaiser 1993). Das dendrochronologisch ermittelte Sterbealter eines solchen Baumes kann deshalb, falls nur der untere Teil eines Stammes gefunden wird, geringfügig zu alt ausfallen, was aber bei der Präzision dieser Datierungsmethode nicht allzusehr ins Gewicht fällt.

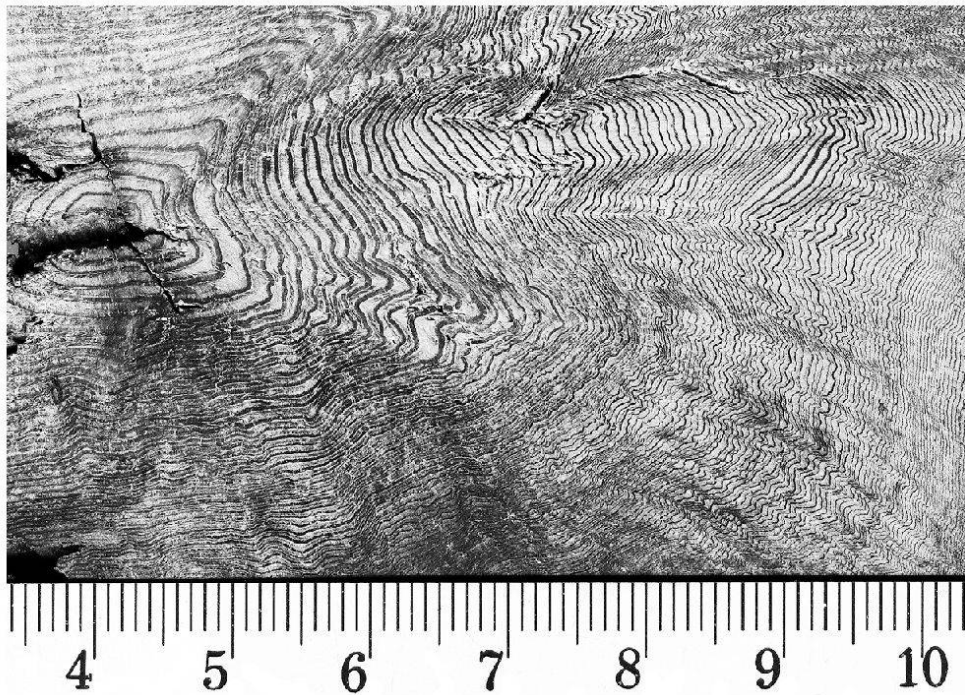


Fig. 6: Durch den Auflagedruck des Gornergletschers stark gepresster Lärchenstamm mit einem Radiokarbonalter der peripheren Jahrringe von 8550 ± 95 yBP [UZ-1831]. Massstabskala: 1 Teilstrich = 1 mm.

2.3 Gletschergeschichtliche Interpretation

Die zeitlich und räumlich exakte Rekonstruktion von Gletscherschwankungen gelingt streng genommen nur mit fossilen Baumteilen, die am Wuchsort, d. h. in situ gefunden werden. Bei der Interpretation von Bäumen, die nicht in situ sind und als Streufunde bezeichnet werden, ist Vorsicht geboten. Sie können mehrfach umgelagert und weitab

vom ursprünglichen Wuchsort sein. Manchmal sind sie trotzdem gletschergeschichtlich auswertbar, beispielsweise dann, wenn sich ihre Jahrringbreitenkurven mit denen gleichaltriger In-situ-Bäume verknüpfen (synchronisieren) lassen (vgl. Kap. 3.2 und Holzhauser 1995).

Die Möglichkeit, dass Bäume Lawinen oder Murgängen zum Opfer fielen und ins Gletschervorfeld gelangten, ist nie ganz auszu-

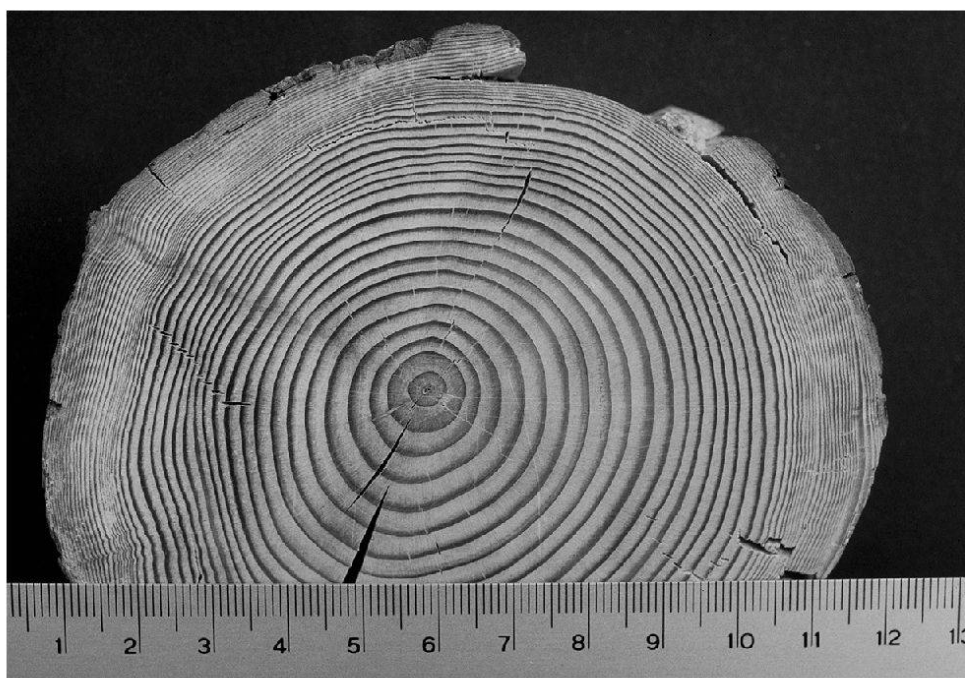


Fig. 7: Deutliche Verengung der äusseren Jahrringe einer Lärche als Folge des heranrückenden Grossen Aletschgletschers. Der Baum starb während der Vorstossphase im 16./17. Jahrhundert. Massstabskala: 1 Teilstrich = 1 mm.

schliessen. Deshalb, und dies gilt sowohl für In-situ-Bäume als auch für Streufunde, darf aufgrund eines einzelnen Holzfundes noch nicht auf einen Gletschervorstoss geschlossen werden. Erst wenn an verschiedenen, weit voneinander auseinander liegenden Stellen im Gletschervorfeld gleichaltriges fossiles Holz gefunden wird, kann als Ursache der Zerstörung ein Gletschervorstoss angenommen werden.

Findet man beispielsweise einen Strunk in situ mit Mark und Waldkante (letzter gebildete Jahrring eines Baumes) in unmittelbarer Nähe des aktuellen Eisrandes, kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden: Während der gesamten Lebensspanne des Baumes (Anzahl Jahrringe vom Mark bis zur Waldkante) war der Gletscher nie grösser als heute. Mit der Datierung des äussersten Jahrringes hat man den genauen Zeitpunkt des Gletschervorstosses bestimmt. Da ein Baum erst nach einer gewissen Zeit nach dem Schwinden des Eises im Gletschervorfeld wieder Fuss fasst, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Gletscherrand zur Zeit der Keimung des Baumes nicht in unmittelbarer Nähe des heutigen Fundortes befand. Der ungefähre Abstand zum Eisrand kann ungefähr abgeschätzt werden, indem man von den heutigen Besiedlungsverhältnissen im gletschernahen Bereich ausgeht (Distanz erste eingewanderte Bäume – Eisrand). Diesbezüglich sind Untersuchungen über die Einwanderungsgeschwindigkeit von Nadelhölzern in Gletschervorfelder äusserst wertvoll. In tief liegenden Gletschervorfeldern der Walliser Alpen kann in günstigen Fällen bereits 5 Jahre nach dem Eisfreiwerden mit der Wiederbesiedlung durch die Lärche gerechnet werden (Bleuler 1986). In der Regel aber dauert es zwischen 10 und 20 Jahre (Sommer 1988, Bohnenblust 1988, Grundler 1990). Mit bis zu 45 Jahren nach dem Rückgang des Eises braucht die Arve bedeutend länger, um im Vorfeld wieder Fuss zu fassen (Lüdi 1958).

Die Altersbestimmung eines fossilen Baumes und damit die zeitliche Einstufung eines

Gletschervorstosses erfolgt überwiegend mit der Radiokarbonmethode. Die Radiokarbonalter sind aber methodenbedingt mit einem zum Teil erheblichen Fehler behaftet, so dass ein Gletschervorstoss in der Regel nicht genauer als auf 100 bis 200 Jahre genau festgelegt werden kann. An eine feine zeitliche Auflösung der Gletschergeschichte allein mit Radiokarbonaten ist folglich nicht zu denken. Bei gutem Erhaltungszustand des Holzes und einer genügenden Anzahl intakter Jahrringe (ca. 50 bis 100) kann das Sterbejahr des Baumes und damit auch der exakte Zeitpunkt des Gletschervorstosses mit der Dendrochronologie jahrgenau datiert werden. Bedingung ist allerdings, dass eine geeignete Standardchronologie (absolute Jahrringchronologie, d. h. eine kalendergenau datierte Jahrringabfolge) vorliegt. Die dendrochronologische Analyse von fossilen Hölzern erlaubt vor allem im jüngsten Abschnitt des Postglazials eine feine zeitliche Gliederung der Vorstoss- und Rückschmelzphasen (siehe Kap. 3 und 4).

Falls die Jahrringbreitenkurven fossiler Bäume in situ miteinander synchronisiert werden können und die Bäume zudem aus unterschiedlichen Höhenlagen innerhalb des Gletschervorfeldes stammen, lässt sich aus der Differenz ihrer Sterbealter die Vorstosseschwindigkeit des Gletschers ermitteln (Holzhauser 1995, Holzhauser & Zumbühl 1999a). Das Vorgehen bei der Rekonstruktion von Gletschervorstoss- und Gletscherrückschmelzphasen mit Hilfe fossiler Bäume zeigt modellhaft Fig. 8.

Im folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie mit Hilfe der Dendrochronologie fossile Bäume aus den beiden Vorfeldern des Gorner- und des Grossen Aletschgletschers ausgewertet werden konnten.

3. Die Vorstösse des Gornergletschers im Hoch- und Spätmittelalter

Der Gornergletscher bei Zermatt ist der zweitgrösste Gletscher der Schweizer Alpen. Seine maximale Länge von 12.9 km wird nur noch vom Walliser Fieschergletscher (14.9 km) und vom Grossen Aletschgletscher (22.85 km) übertroffen (Werte für 2007). Die Fläche des Gornergletschers mit seinen Seitenzuflüssen kann mit etwa 54 km² beziffert werden. Seit dem letzten Hochstand um 1859 ist die Gletscherzunge mit einem jährlichen Schwund

von durchschnittlich 18.5 m insgesamt um 2560 m kürzer geworden. Das Zungenende des Gornergletschers liegt heute auf ca. 2140 m und damit deutlich unter der aktuellen oberen Waldgrenze, die Hess (1942) mit 2370 m beziffert und als die höchste im Wallis bezeichnet.

Während verschiedener Vorstossphasen innerhalb des Postglazials hat der Gornergletscher Bäume unter sich begraben, deren

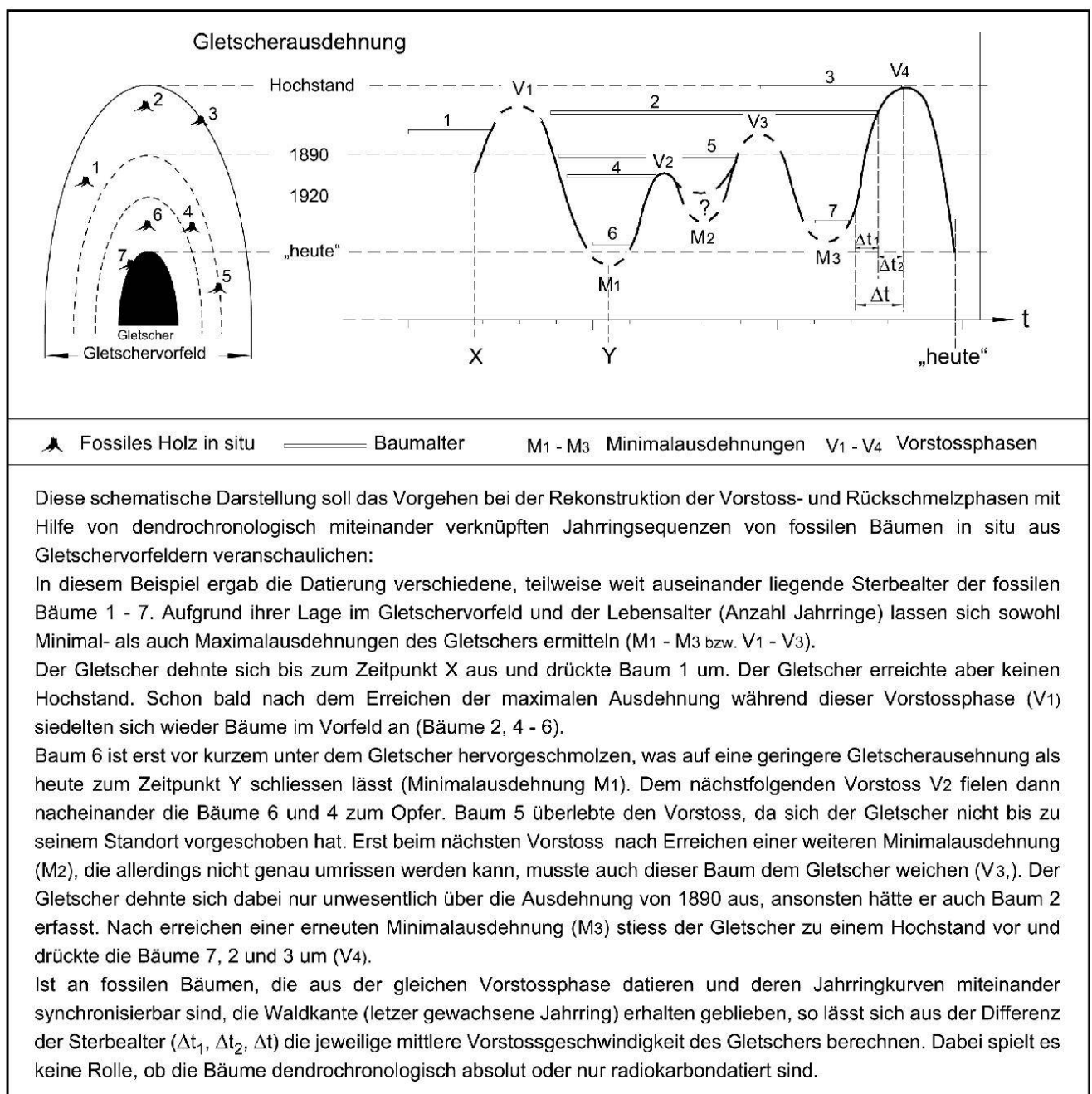


Fig. 8: Rekonstruktion von Vorstoss- und Rückschmelzphasen mit Hilfe datierter fossiler Bäume aus dem Gletschervorfeld [Modell nach Holzhauser 1984b, leicht verändert].

hauser 1995, Broeker 2001), wurde kurzfristig von einem Vorstoss im 11. und 12. Jahrhundert unterbrochen, der an mehreren Alpengletschern nachgewiesen und absolut datiert ist (Tab. 1).

Es darf deshalb angenommen werden, dass der Gornergletscher vor/um 1057 ähnlich klein war wie dies heute der Fall ist und um 1170 über eine Ausdehnung von 1954 hinaus vorgestossen ist. Im Jahr 1186 schliesslich war er so gross wie um 1949. Anschliessend dehnte er sich nicht mehr allzu weit aus,

Von Mitte des 8. bis gegen Ende des 13. Jahrhunderts herrschten überwiegend warme und somit gletscherfeindliche Klimabedingungen. Der Gornergletscher war während etwa 550 Jahren nie grösser als um 1940 (Fig. 9). Diese mittelalterliche Warmphase, die häufig auch als «Mittelalterliches Klimaoptimum» bezeichnet wird (Huges & Diaz 1994, Holz-

Gletscher	Holzart	Radio-karbonalter (yBP)	Dendro-Alter (A.D.)	Aussage bezüglich Ausdehnung	Autor
Glacier de Zinal	Larix decidua	920±50	970 - 1159	ca. 1920	Haas (1978)
Glacier de Ferpècle	Larix decidua	1030±70	964 - 1125	unbestimmt	Röthlisberger F. et al. (1980)
Unterer Grindelwald-gletscher	Pinus cembra (6 Bäume)		Sterbealter zwischen 1088 und 1137	Ende des 19. Jahrhunderts (?)	Holzhauser & Zumbühl (1999b)
Grosser Aletsch-gletscher	Pinus cembra	810±65	973 - ca. 1100	ca. 1926/27	Holzhauser (1984a)

Tab. 1: Zusammenstellung absolut datierter Bäume aus Gletschervorfeldern, die innerhalb der Vorstossphase im 12. Jahrhundert starben.

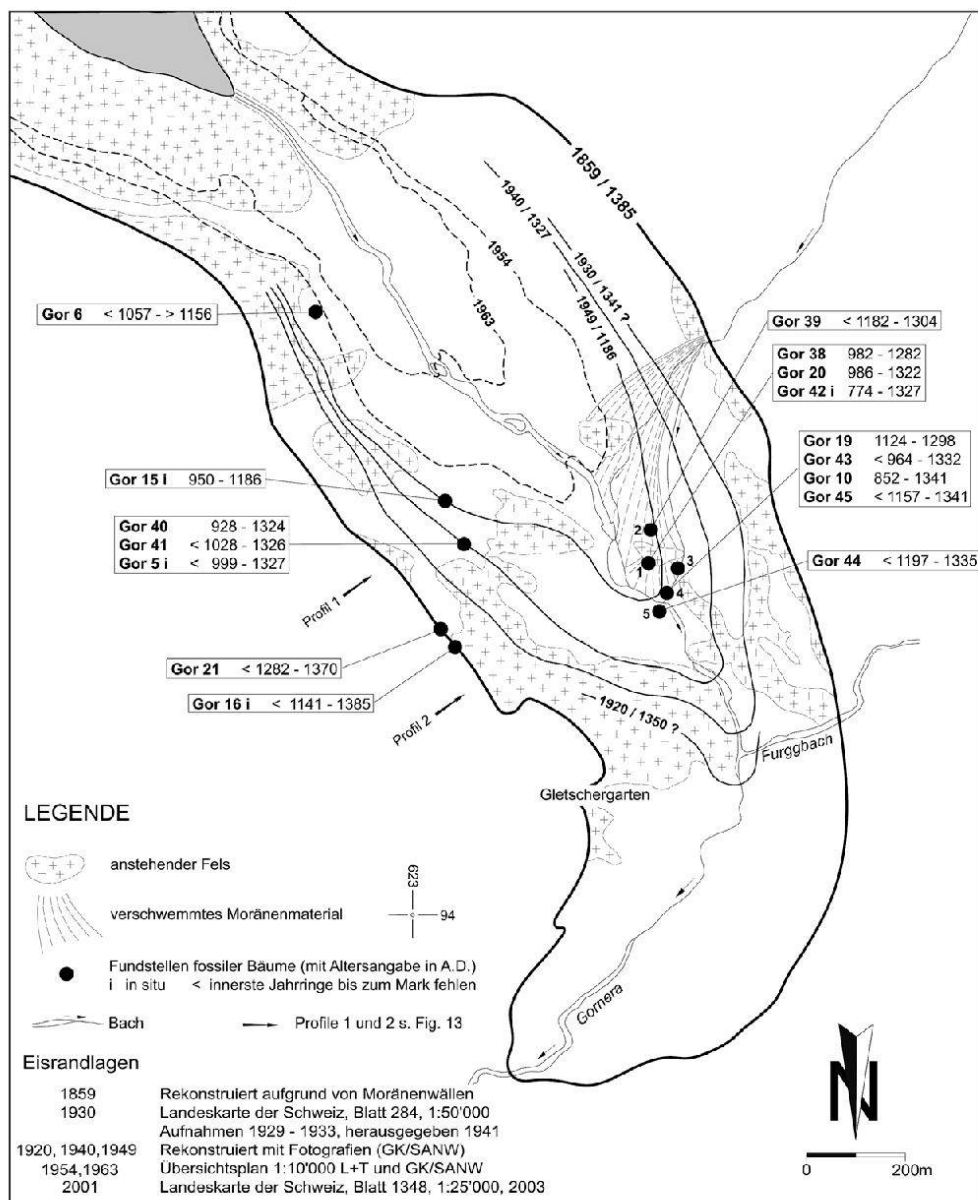


Fig. 10: Fundstellen fossiler Lärchen im Vorfeld des Gornergletschers und deren dendrochronologisch ermitteltes Alter in Kalenderjahren.

ansonsten hätte er Lärchen umgedrückt, die erst im 14. Jahrhundert während eines erneuten Vorstosses starben (Fig. 10).

3.2 Der spätmittelalterliche Vorstoss im 14. Jahrhundert als Auftakt zur «Kleinen Eiszeit»

Kurz nach 1186 bildete sich der Gornergletscher wieder zurück, wie weit lässt sich leider nicht feststellen. Erst gegen Ende des 13. Jahrhunderts herrschten wieder klimatische Verhältnisse, die das Gletscherwachstum förderten und den Beginn der sog. «Kleinen Eiszeit» einleiteten. Der Gornergletscher setzte erneut zu einem Vorstoss an, der sich über einen längeren Zeitraum erstreckte und der zu einem Hochstand im 14. Jahrhundert führte. Im Unterschied zu anderen Alpengletschern, an denen nur der spätmittelal-

terliche Hochstand nachgewiesen ist (z. B. am Rhonegletscher und am Grossen Aletschgletscher, Holzhauser 1984a, Zumbühl & Holzhauser 1988), kann am Gornergletscher die gesamte Vorstossphase sowohl zeitlich als auch räumlich recht genau rekonstruiert werden.

Wie erwähnt, überlebten einige Lärchen den Vorstoss im 12. Jahrhundert und wurden erst Ende des 13. Jahrhunderts und im 14. Jahrhundert vom Gornergletscher im Verlaufe der spätmittelalterlichen Vorstossphase erfasst (Fig. 10). Die Jahrringbreitenkurven der dendrochronologisch absolut datierten fossilen Lärchen sind in Fig. 11 in Synchronlage zusammengestellt.

Auf einen frühen Beginn dieser Vorstossphase weisen fossile Lärchen hin, die um 1300 starben. Weitere Lärchen kamen zwischen 1322 und 1327 unter das Eis. Um 1327 wies

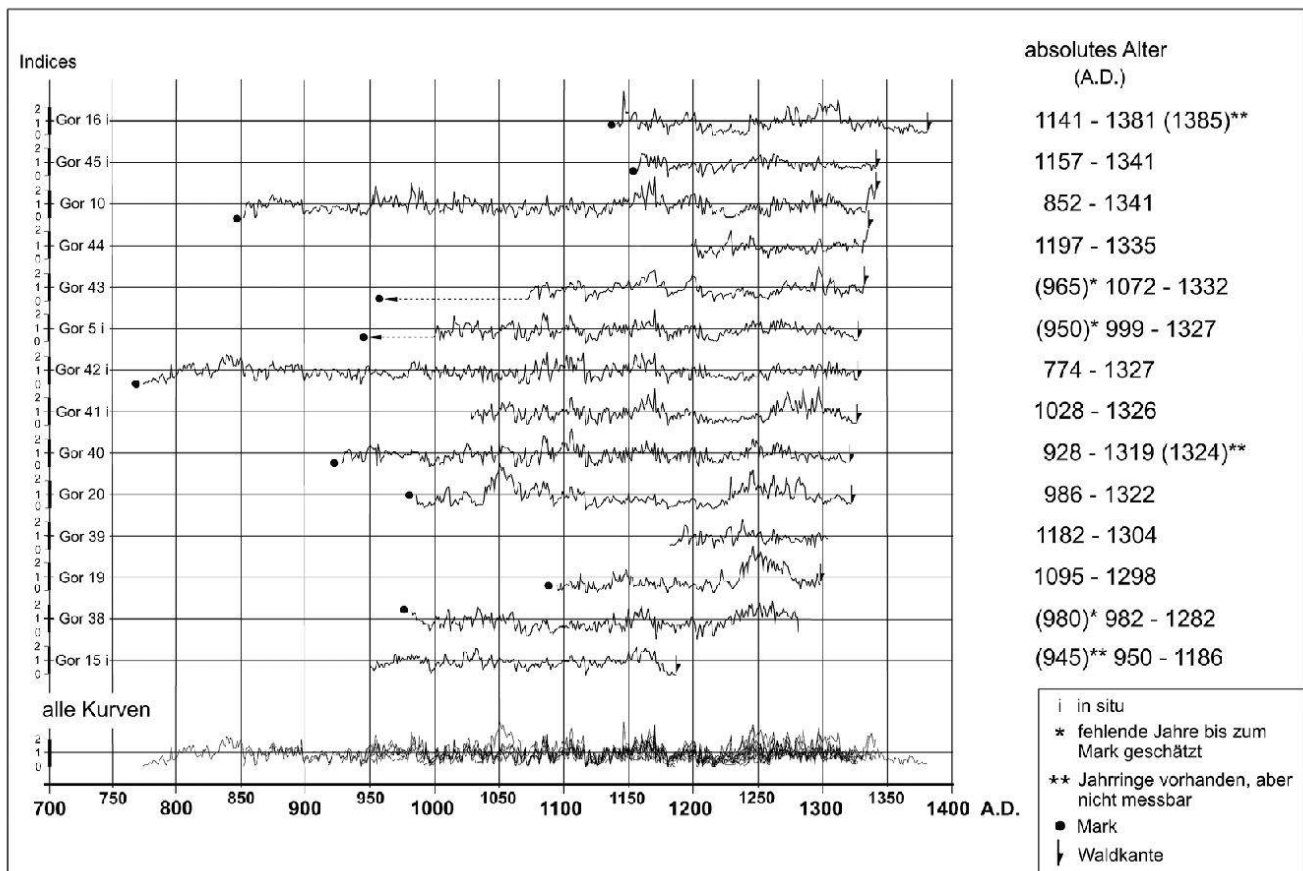


Fig. 11: Indexierte Jahrringbreitenkurven dendrochronologisch absolut datierter Lärchen aus dem Vorfeld des Gornergletschers, die innerhalb des Hoch- und Spätmittelalters vom Gletscher umgedrückt wurden.

der Gornergletscher eine Ausdehnung wie um 1940 auf (Fig. 10). Mit Ausnahme von Lärche Gor 5 deutet an den Fundstellen nichts darauf hin, dass die fossilen Überreste der Lärchen, die zwischen ca. 1300 und 1327 starben, in situ sind. Ihre ehemaligen Standorte müssen sich ausserhalb der Fläche, die der Gornergletscher um/kurz nach 1186 eingenommen hatte (Ausdehnung wie um 1949), befunden haben, wobei der Umriss des Gletschers um 1327 (entspricht der Ausdehnung wie um 1940) die äusserste Grenze der möglichen Standorte bildet. Die Lärche Gor 42, die 1327 starb und seit mindestens 774 im Vorfeld stockte (geschätztes Keimalter um 748⁴¹), bezeugt die mehrhundertjährige Periode geringer Gletscherausdehnung während des «Mittelalterlichen Klimaoptimums».

Ausser diesen teilweise über 500 Jahre alt gewordenen Lärchen besiedelten damals auch bis zu 300jährige Arven, deren fossile Reste Radiokarbonalter zwischen 600 bis 700 yBP ergaben, das Vorfeld. Eine dendrochronologische Datierung dieser Bäume ist vorderhand nicht möglich, da sich ihre Jahringbreitkurven nicht in eine bestehende Standardchronologie einpassen lassen.

Das anhaltende Vorrücken des Gornergletschers im 14. Jahrhundert ist mit Lärchen dokumentiert, die zwischen 1332 und 1341 vom Gletscher erfasst wurden (Fig. 10). Auch die Überreste dieser Lärchen sind nicht in situ vorgefunden worden. Um den ungefähren Wuchsort dieser Bäume bestimmen zu können, müsste der Vorstossbetrag zwischen 1327 und 1341 genau bekannt sein. Dies ist aber nicht der Fall, weshalb die vom Gletscher innerhalb dieser Zeitspanne zurückgelegte Distanz abgeschätzt werden muss. Unter Annahme einer durchschnittlichen Vorstossgeschwindigkeit von 10 m/Jahr (dies entspricht etwa der durchschnittlichen Vorstossgeschwindigkeit zwischen 1800 und 1859) schob sich das Zungenende von 1327 bis 1341 um rund 140 m talabwärts, und der Gornergletscher nahm dabei Ausmasse wie um 1930 an. Die Lärchen wuchsen somit

höchstwahrscheinlich zwischen den Umrissen des Gornergletschers um 1940 (entspricht der Ausdehnung um 1327) und um 1930. Es ist anzunehmen, dass die betreffenden Lärchen hangaufwärts direkt oberhalb der Fundstellen 3 bis 5 (Fig. 10) standen. In diesem flachen Geländeabschnitt am linken Talhang haben sich heute nämlich zahlreiche Lärchen angesiedelt. Es darf davon ausgegangen werden, dass dieser Geländeabschnitt sich auch früher für das Baumwachstum eignete. Ein anderer Standort weiter hangaufwärts kommt nicht in Frage, da steile Felswände hier das Vorfeld begrenzen.

Nach 1341 stiess der Gornergletscher kräftiger vor als in den vergangenen Jahrzehnten. Auslöser für dieses starke Anwachsen des Gletschers war eine Aufeinanderfolge von ausserordentlich gletschergünstigen Sommern in den 1340er Jahren, insbesondere die nasskalten Sommer von 1345-1347 (Pfister 1985). Die Vorstossphase endete mit einem Hochstand um 1385. Dies ergab die dendrochronologische Datierung einer Lärche, die in den Hochstandswall eingearbeitet wurde (Fig. 10, Gor 16).

Zusammenfassend kann bezüglich dieser spätmittelalterlichen Vorstossphase folgendes festgehalten werden (Fig. 12 und Fig. 13): Zwischen ca. 1300 bis 1341 waren die Vorstossbeträge mit 7-8 m pro Jahr sehr bescheiden. Die vom Gornergletscher in diesem Zeitraum zurückgelegte Distanz war kaum grösser als 300 m.

Von 1341 bis zum anschliessenden Hochstand um 1385 rückte der Gornergletscher mit einer jährlichen Geschwindigkeit von 20 m bedeutend kräftiger vor. Das Zungenende verlagerte sich dabei um etwa 900 m talabwärts. Der Betrag von 20 m pro Jahr ist etwa doppelt so gross wie derjenige während der letzten Vorstossphase zwischen 1800 und 1859 mit 9.8-11 m (Holzhauser 2001).

4. Der neuzeitliche Vorstoss des Grossen Aletschgletschers im 16./17. Jahrhundert

Der Grosse Aletschgletscher gehört dank seinen beachtlichen Dimensionen zu den imposantesten Eisströmen der Alpen. Mit einer Fläche von 81.69 km² (1998) und einer Länge von 22.85 km (2007) ist er sowohl der grösste als auch der längste Alpengletscher. Wie eingangs erwähnt, erreichte der Grosse Aletschgletscher seinen letzten Hochstand um 1856 (Fig. 2). Seither ist seine Zunge um rund 4 km

kürzer geworden, was einem jährlichen Schwundbetrag von ca. 26 m entspricht.

Zu Beginn des 14. Jahrhunderts stiess der Grosse Aletschgletscher wie auch der Gornergletscher vor und erreichte kurz nach 1370 einen Hochstand. Im Gegensatz zum Gornergletscher gelingt die Rekonstruktion dieser Vorstossphase beim Grossen Aletschgletscher bei weitem nicht so gut. Viel

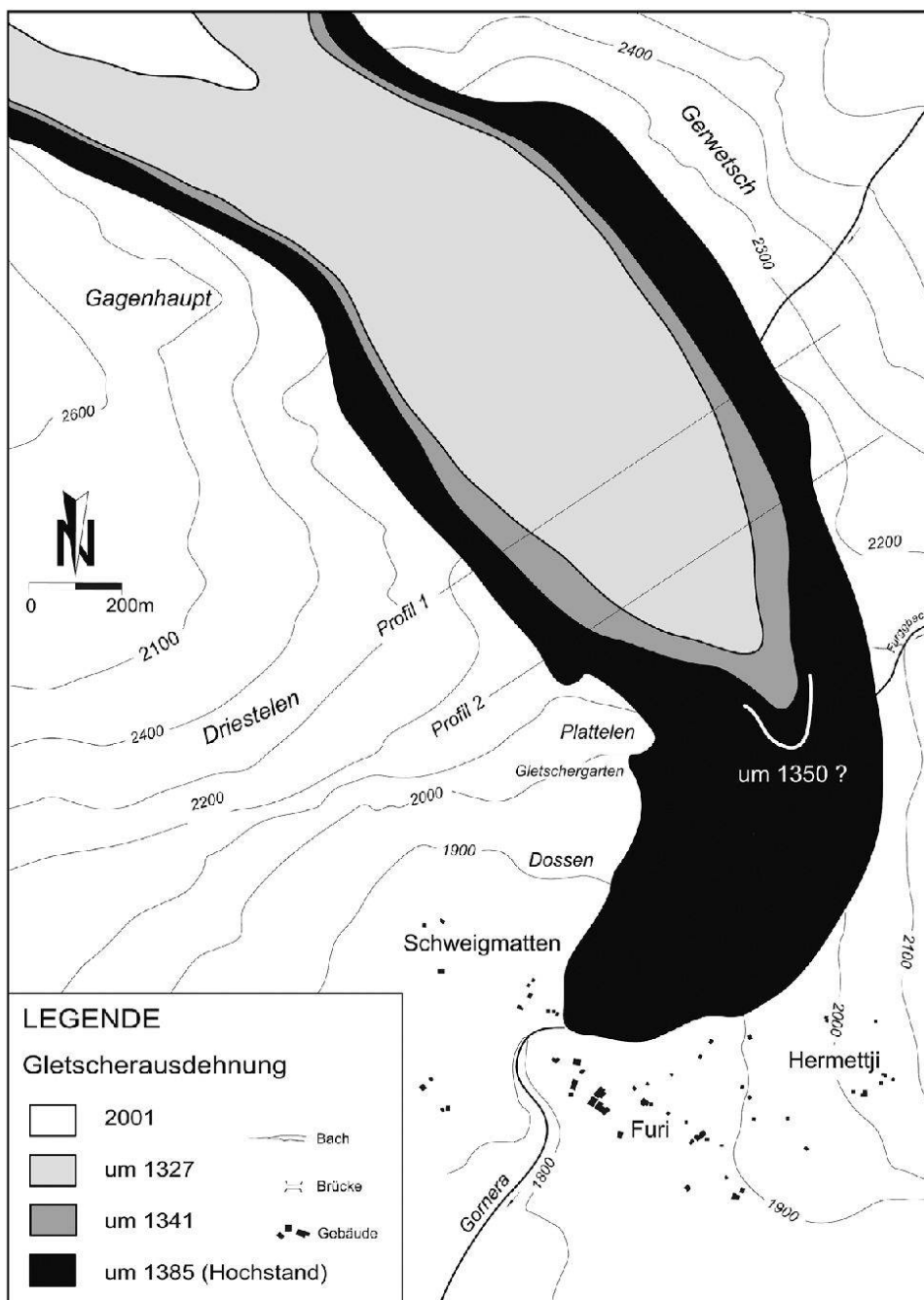


Fig. 12: Der Vorstoss des Gornergletschers im Spätmittelalter von 1327 bis zum Hochstand im Jahr 1385, rekonstruiert mit Hilfe dendrochronologisch absolut datierter Lärchen.

genauer dokumentieren hingegen lässt sich die Vorstossphase gegen Ende des 16. Jahrhunderts, die um 1678 in einem weiteren Hochstand kulminierte. Auch hier gelang die Rekonstruktion dank zahlreichen dendrochronologisch absolut datierten fossilen Lärchen in situ aus dem Gletschervorfeld.

Als Antwort auf eine Klimaverschlechterung, die um 1570 einsetzte (Pfister 1984), begann der Grosse Aletschgletscher vorzustoßen. Die ersten Lärchen wurden vom Gletscher an der linken Talflanke in den Jahren 1581, 1584, 1586 sowie 1587 umgedrückt (Fig. 14). Die Reste dieser Lärchen, die sich noch am Wuchsort befinden, sind erst kürzlich aus dem Moränenschutt herausero-

diert. Im Jahre 1590 erfasste der Grosse Aletschgletscher eine weitere Lärche (AL 79) auf der rechten Talseite und war dabei geringfügig grösser als um 1920. Anschliessend bis zum Jahr 1600 ist der Grosse Aletschgletscher bis zu einer Ausdehnung von 1885 angewachsen (AL 86). Der Vorstoss des Grossen Aletschgletschers dauerte auch im 17. Jahrhundert an. Bis zum Jahr 1630 hat sich das Zungenende um weitere 595 m vorgeschoben und war nicht mehr allzu weit vom Hochstandsbereich entfernt. Die Veränderungen des Grossen Aletschgletschers in den darauf folgenden Jahrzehnten sind nicht mehr lückenlos rekonstruierbar. Fest steht, dass er im Jahr 1653 bedrohliche Ausmasse

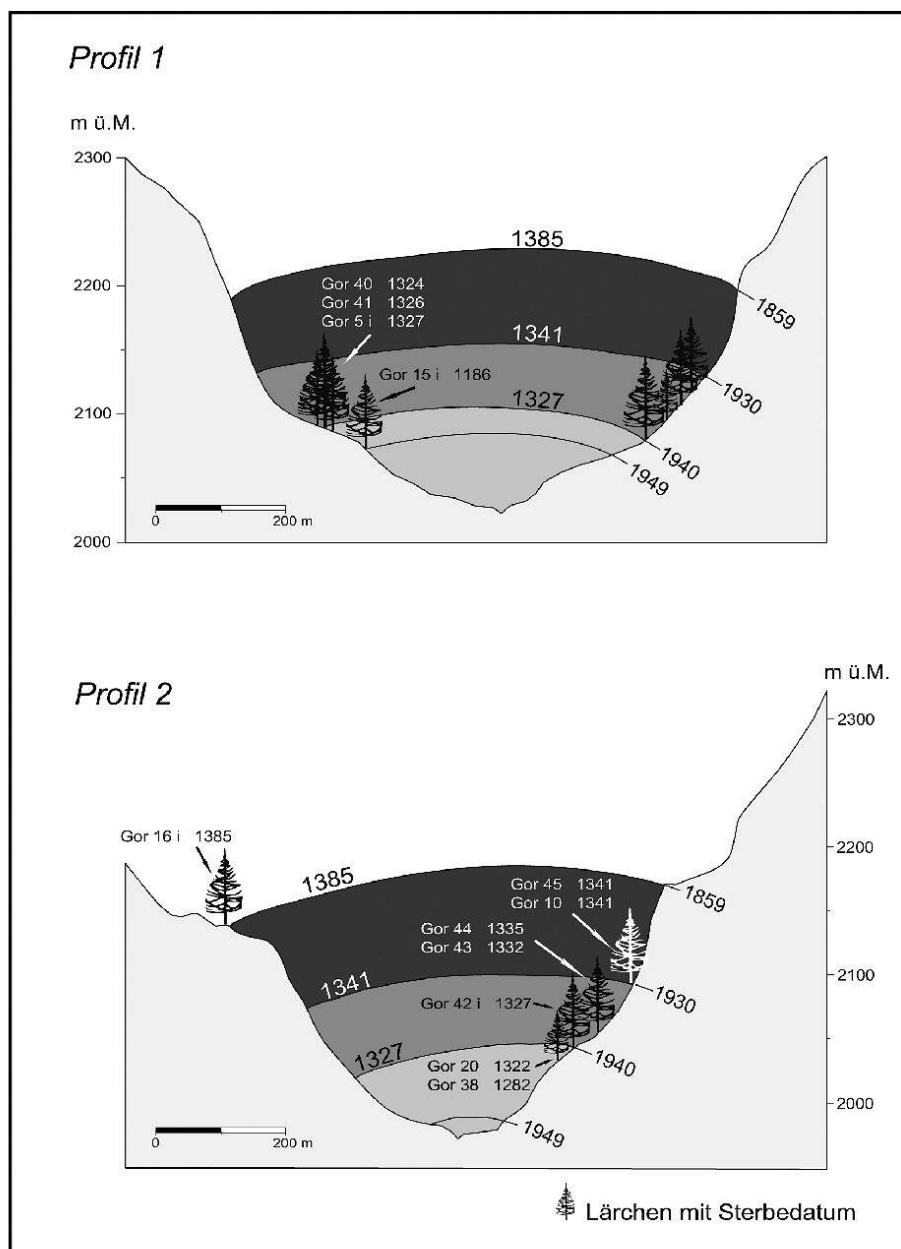


Fig. 13: Dickenzunahme des Gornergletschers innerhalb der Vorstossphase von 1327 bis 1385 (Profile vgl. Fig. 12).

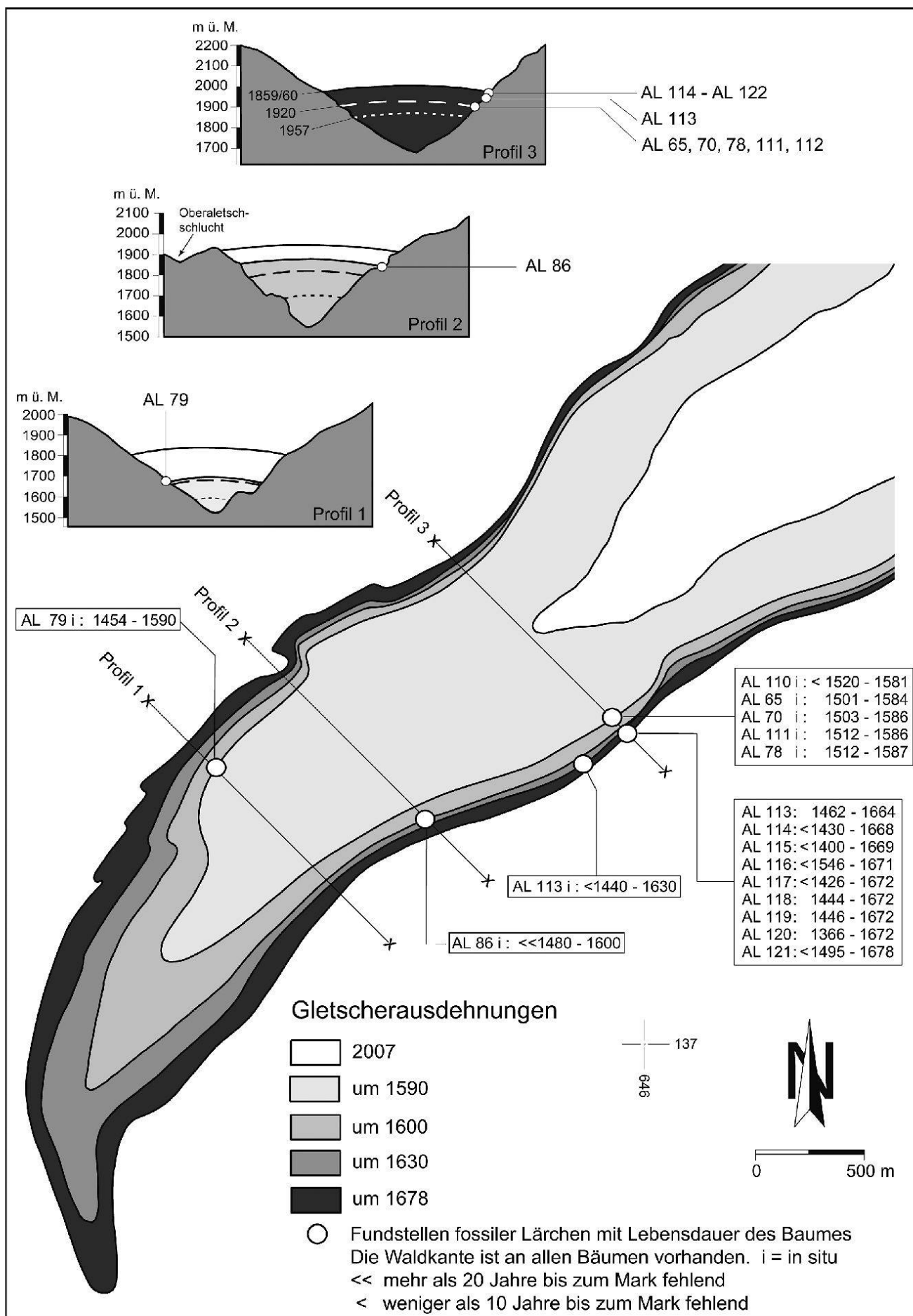


Fig. 14: Der Vorstoss des Grossen Aletschgletschers von 1581 bis 1678, rekonstruiert mit Hilfe dendrochronologisch absolut datierter Lärchen.

angenommen hatte und die Talbewohner dazu bewog, eine Prozession durchzuführen mit dem Ziel, den Gletscher zu bannen und ihm so Einhalt zu gebieten (Lütschg 1926, Holzhauser 1984a). Gemäss dieser schriftlich überlieferten Gletscherbannung kam der Grosse Aletschgletscher kurz darauf zum Stillstand. Allerdings war dieser Halt nur von kurzer Dauer, denn in den Hochstandswall eingebettete Lärchen, die zwischen 1664 und 1678 starben, deuten auf ein weiteres, unvermindertes Vorrücken des Grossen Aletschgletschers auch nach 1653 hin (Fig. 14).

Damit steht fest, dass der Grosse Aletschgletscher seine maximale Ausdehnung erst im Jahre 1678 erreicht hatte, ähnlich spät wie der Gornergletscher (1666/67, vgl. Fig. 9). Der Grosse Aletschgletscher dürfte damals etwa gleich ausgesehen haben wie während des Hochstandes um die Mitte des 19. Jahrhunderts (Fig. 2).

Dank der genauen Rekonstruktion der Gletscherlängenänderung mit Hilfe von dendrochronologischen Datierungen lassen sich auch hier durchschnittliche Geschwindigkeiten ableiten, mit denen der Grosse Aletschgletscher im 16. und 17. Jahrhundert sein Zungenende verlagerte: Von 1581 bis 1600 stiess er jährlich mit rund 36 m und zwischen 1600 und 1630 jährlich mit 20 m vor. Insgesamt verlängerte sich die Gletscherzunge von 1581 bis 1630 um rund 1275 m. Von 1630 bis zum Hochstand um 1678 stiess der Grosse Aletschgletscher mit einer Geschwindigkeit von 7-8 m pro Jahr nur noch langsam vor, insgesamt um 350 m. Über die gesamte, knapp hundert Jahre dauernde Vorstossphase von 1581 bis 1678 ergibt sich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 17 m pro Jahr, mit der sich das Zungenende talabwärts bewegte.

Neben den Lärchen, die eindeutig durch die Einwirkung des Gletschers starben, liegen einige Lärchenstämme mit deutlichen Axt- und Sägespuren ausserhalb des Vorfeldes am Hochstandswall. Das Fällalter dieser Bäume liegt zwischen 1690 und 1711. Es ist anzuneh-

men, dass diese Bäume im randlichen Bereich des Gletschervorfeldes vorsorglich gefällt wurden in der Ungewissheit über die weitere Entwicklung des Grossen Aletschgletschers am Ende des 17. Jahrhunderts.

Anmerkungen

- ¹⁾ Die «Kleine Eiszeit» (engl. Little Ice Age), ein gletschergeschichtlich definierter Begriff, umfasst den Zeitraum von Ende des 13. Jahrhunderts bis 1850/60 und ist gekennzeichnet durch drei Hochstandsphasen im 14., 17. und im 19. Jahrhundert (vgl. Fig. 9). Innerhalb dieses knapp 600 Jahre dauernden Zeitraumes waren die Alpengletscher nie so klein wie heute.
- ²⁾ Bei allen nicht näher bezeichneten Jahrzahlen handelt es sich um Jahre nach Christi Geburt.
- ³⁾ Radiokarbonjahre werden mit BP oder yBP («before present» bzw. «years before present» = «Jahre vor heute») angegeben. Als Bezugsjahr («heute») wird das Jahr 1950 genommen. Zum Beispiel bedeutet 8550 ± 95 yBP: 8550 Radiokarbonjahre vor 1950 mit einem Fehler von ± 95 Jahren (1 σ -Bereich).
- ⁴⁾ Um das Keimalter eines Baumes bestimmen zu können, müsste man eine Probe direkt am Stammansatz entnehmen, denn nur dort befindet sich das älteste Mark und die vollständige Anzahl Jahrringe. Je höher am Stamm eine Probe entnommen wird, desto jünger ist das Markalter und desto weniger Jahrringe sind vorhanden. Bei Fragmenten von fossilen Stämmen ist oft nicht erkennbar, aus welcher Höhe des Baumes diese stammen, es sei denn, der Wurzelstock ist noch erhalten. Bleuler (1986) entwickelte aufgrund von Untersuchungen an lebenden Lärchen im Vorfeld des Gornergletschers eine Formel, mit der bei bekannter Entnahmehöhe der Probe am Stamm das Keimalter eines Baumes näherungsweise bestimmt werden kann. Da Bleuler im Vorfeld des Gornergletschers arbeitete, ist diese Formel auch auf fossiles Material aus diesem Vorfeld übertragbar. Aufgrund verschiedener Unsicherheitsfaktoren (z. B. Standort, konkurrenzierende Bäume) ist eine Bestimmung des Keimalters nicht genauer als auf ± 5 Jahre möglich.
Die Lärche Gor 15 weist 50 cm ab Wurzelansatz ein Markalter von 950 auf (erster gemessene Jahrring 951). Das berechnete Keimalter beträgt in diesem Falle 936 ± 5 . Lärche Gor 42 weist ca. einen Meter ab Stammansatz ein Markalter von 773 auf (erster gemessene Jahrring 774). Das geschätzte Keimalter beträgt hier 748 ± 5 .

Der Autor ist dankbar für jeden Hinweis auf Hölzer, die in Gletschervorfeldern gefunden werden.

Literatur

- Bellwald, W. 1992: Drei spätneolithische Pfeilbogen aus dem Gletschereis am Lötschenpass. *Archäologie der Schweiz*, 15(4), 166-171.
- Bezinge, A. 1976: Troncs fossiles morainiques et climat de la période Holocène en Europe. *Bull. de la Murithienne*, 93, 93-111. Sion.
- Bless R., 1984: Beiträge zur spät- und postglazialen Geschichte der Gletscher im nordöstlichen Mont Blanc Gebiet. *Physische Geographie*, 15. Zürich.
- Bleuler, M. 1986: Jahrringanalysen von Lärchen in Gletschervorfeldern. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Bohnenblust, S. 1988: Gletschergeschichtliche Untersuchungen und dendrochronologische Analysen an Lärchen (*Larix decidua* Mill.) im Val d'Hérens und im Raume Zermatt (VS). (Glacier d'Arolla, Glacier de Ferpècle und Zmuttgletscher). Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Broeker, W. S. 2001: Was the Medieval Warm Period Global? *Science*, 291, 1497-1499.
- Collomb, E. 1849: De l'envahissement séculaire des glaciers des Alpes. Observations faites en août et septembre 1848, par E. Collomb. Supplément à la Bibliothèque universelle de Genève, *Archives des sci. nat.*, Tome I: 1-16. Genève. Auch erschienen als: *Envahissement séculaire des glaciers des Alpes*, par Ed. Collomb. *Archives des sci. phys. et nat. de Genève*, 10, 30-43. Genève.
- Furrer, G. & Holzhauser, H. 1984: Gletscher- und klimageschichtliche Auswertung fossiler Hölzer. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Suppl. Bd. 50: 117-136.
- Grundler, L. 1990: Dendrochronologische Untersuchungen im Raum Saas-Fee. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Haas, P. 1978: Gletschergeschichte im Val d'Anniviers. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Haeberli, W. 1994: Schwund der Alpengletscher und globaler Treibhauseffekt. *Die Alpen*, 70(4), 174-176. Bern.
- Hess, E. 1935: Die Holzfunde am Findelengletscher. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 86(1), 57-67. Bern. [siehe auch: *Die Alpen*, 11(8), 1935: 281-290. Bern].
- Hess, E. 1942: Die natürlichen Waldgrenzen im Kanton Wallis. *Bull. de la Murithienne*, 59, 50-65. Sion.
- Holzhauser, H. 1984a: Zur Geschichte der Aletsch- und des Fieschergletschers. *Physische Geographie*, 13. Zürich.
- Holzhauser, H. 1984b: Rekonstruktion von Gletscherschwankungen mit Hilfe fossiler Hölzer. *Geographica Helvetica*, 39 (1), 3-15.
- Holzhauser, H. 1995: Gletscherschwankungen innerhalb der letzten 3200 Jahre am Beispiel des Grossen Aletsch- und des Gornergletschers. Neue Ergebnisse. In: *Gletscher im ständigen Wandel. Publikationen der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW/ASSN)*, 6, 101-122. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Holzhauser, H. 2001: Der Vorstoss des Gornergletschers von 1791 bis 1859 im Spiegel historischer Bild- und Schriftquellen. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich*, 146(4), 95-104. Zürich.
- Holzhauser, H. 2007: Holocene Glacier Fluctuations in the Swiss Alps. In: Mordant, C.; Richard, H. & Magny, M. (eds.) 2007: *Environnements et cultures à l'Âge du Bronze en Europe occidentale*. Comité des travaux historiques et scientifiques, Cths Collection: Documents préhistoriques numéro 21, 29-43, Paris.
- Holzhauser, H. & Zumbühl, H.J. 1996: To the history of the Lower Grindelwald Glacier during the last 2800 years – palaeosols, fossil wood and historical pictorial records – new results. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.*, Suppl. Bd. 104, 95-127.
- Holzhauser, H. & Zumbühl, H.J. 1999a: Glacier Fluctuations in the Western Swiss and French Alps in the 16th Century. In: Pfister, C. and Brázdil, R. (eds.): *Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and Its Social Dimension*. *Climatic Change*, 43, 223-237.
- Holzhauser H. & Zumbühl H. J. 1999b: Nacheiszeitliche Gletscherschwankungen. Blatt 3.8 des Hydrologischen Atlas der Schweiz. Bern.
- Hughes, M.K. & Diaz, H.F. 1994: The Medieval Warm Period. *Climatic Change*, Special issue, 26, [2-3].
- IPCC 1995: *Climate Change 1995. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kaiser, K.-F. 1993: Beiträge zur Klimageschichte vom späten Hochglazial bis ins frühe Holozän, rekonstruiert mit Jahrringen und Molluskenschalen aus verschiedenen Vereisungsgebieten. *Physische Geographie*, 36. Zürich.
- Luckman, B. H. 1993: Glacier fluctuation and tree-ring records for the last millennium in the Canadian Rockies. *Quat. Sci. Rev.*, 12(6), 441-450.
- Luckman, B. H. 1995: Calendar-dated, early «Little Ice Age» glacier advance at Robson Glacier, British Columbia, Canada. *The Holocene*, 5(2) 149-159.
- Lüdi, W. 1958: Beobachtungen über die Besiedlung von Gletschervorfeldern in den Schweizer Alpen. Abdruck aus *Flora oder allg. Bot. Zeitung*, 146, 386-407. Jena.

- Lütschg, O. 1926: Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge. Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes. Ein Beitrag zur Fluss- und Gletscherkunde der Schweiz. Schweizer Wasserwirtschaftsverband – Verbandsschrift Nr. 14. Veröff. der Hydrolog. Abteilung der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt in Zürich.
- Nicolussi, K. & Patzelt, G. 1996: Reconstructing glacier history in Tyrol by means of tree-ring investigations. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 32 (1996), 207-215. Innsbruck.
- Oeschger, H. & Röthlisberger, H. 1961: Datierung eines ehemaligen Standes des Aletschgletschers durch Radioaktivitätsmessungen an Holzproben und Bemerkungen zu Holzfunden an weiteren Gletschern. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 4(3), 191-205. Innsbruck.
- Pfister, C. 1984: Das Klima der Schweiz 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. Bd.1: Klimageschichte der Schweiz 1525-1860. Academica helvetica 6. Bern und Stuttgart.
- Pfister, C. 1985: Veränderungen der Sommerwitterung im südlichen Mitteleuropa von 1270-1400 als Auftakt zum Gletscherhochstand der Neuzeit. Geogr. Helv., 40(4), 186-195.
- Röthlisberger, F. 1976: Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. Sonderheft Die Alpen, 52(3./4), 59-152. Bern.
- Röthlisberger, F., Haas, P., Holzhauser, H., Keller, W., Bircher, W. & Renner, F. 1980: Holocene climatic fluctuations – Radiocarbon dating of soils (fAh) and woods from moraines and glaciers in the Alps. In: Geography in Switzerland, 24th. Internat. Geogr. Congress, Tokyo, Japan, August 1980. Geographica Helvetica, 35(5), 21-52.
- Schneebeli, W. 1976: Untersuchungen von Gletscherschwankungen im Val de Bagnes. Sonderheft Die Alpen, 52(3./4), 5-57. Bern.
- Sommer, I. 1988: Gletschergeschichtliche Untersuchungen und dendrochronologische Analysen an Lärchen (*Larix decidua* Mill.) im Val Ferret und im Raume Zermatt (VS). Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Spindler, K., Rastbichler-Zissernig, E., Wilfing, H. & Nedden, D. zur und Nothdurfter, H. (Hrsg.) 1995: Der Mann im Eis. Neue Funde und Ergebnisse. Veröff. des Forschungsinst. für Alpine Vorzeit der Universität Innsbruck, 2.
- Zumbühl, H. J. & Holzhauser, H. 1988: Alpengletscher in der Kleinen Eiszeit. Sonderheft zum 125jährigen Jubiläum des SAC. Die Alpen, 64(3), 129-322. Bern.