

Gletscherrückgang und Vegetationsentwicklung im Vorfeld des Schwarzenbergferners (Stubai Alpen, Tirol) seit dem Ende der Kleinen Eiszeit

von Thomas Loher, Katharina Sextl, Friederike Grüninger & Thomas Fickert

Keywords: Gletscherrückgang, Primärsukzession, Chronosequenz, Schneedeckendauer, Bodentemperaturen

Gletschervorfelder eignen sich in besonderer Weise, um die Vegetationsentwicklung und die Besiedlungsdynamik auf zuvor unbesiedelten Standorten zu untersuchen. Die vom Eis zurückweichender Gletscher freigegebenen Flächen stellen Standorte dar, deren Pflanzenbesiedlung in der Regel nicht von vorhandenen Samenbanken ausgeht, sondern durch einen Diasporeneintrag von außen erfolgt. Es handelt sich somit fast immer um echte Primärsukzessionen. Ein weit verbreitetes Verfahren längerfristige Entwicklungen zu untersuchen, stellt die Chronosequenz-Methode dar, bei der aus einem räumlichen Nebeneinander unterschiedlicher Standorte ein zeitliches Nacheinander abgeleitet wird. Im Falle von Gletschervorfeldern werden dabei i.d.R. Spuren datierbarer Gletscherstände zur zeitlichen Einordnung herangezogen.

Zwischen 2009 und 2011 wurden im Vorfeld des Schwarzenbergferners am Schrankogel (3497 m ü.d.M.) im oberen Sulztal, einem Nebental des Ötztals, Untersuchungen zum Gletscherrückgang und zur Vegetationsentwicklung seit dem Ende der kleinen Eiszeit (1850er Jahre) durchgeführt. Ergänzt werden die Erhebungen durch eine einjährige Messreihe (01. September 2010 bis 31. August 2011) der Bodentemperaturen, aus denen sich nicht nur die thermischen Bedingungen im Oberboden im Jahresverlauf beurteilen lassen, sondern sich insbesondere auch die Dauer der Schneebedeckung und der Vegetationsperiode der einzelnen Standorte ableiten lässt. Der vorliegende Beitrag fasst die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen zusammen und diskutiert die Vegetationsentwicklung im Vorfeld des Schwarzenbergferners im Wirkungsgeflecht von Dauer der Eisfreiheit, Meereshöhe, Länge der Vegetationsperiode und der Bodentemperaturverhältnisse.

Glacier forelands are particularly suitable to study vegetation dynamics on bare ground. As plant colonization of recently deglaciated glacier forelands is generally not initiated by seed banks but by seed influx from the surroundings, it represents a true primary succession. To investigate long-term developments of vegetation over decades to centuries chronosequences are commonly used. Spatially different sites with a different time span since deglaciation are employed to deduce the temporal sequence. In glacier forelands traces of former glaciation with known date of melt-out are used for dating the test sites.

From 2009 to 2011 research on the glacial retreat since the Little Ice Age and the vegetational development on sites with different time span since melt-out was conducted in the glacier foreland of the Schwarzenbergferner on Schrankogel (3497 m a.s.l.) in the upper Sulz valley, a tributary of the Oetz valley in Tirol (Austria). Complemented are the studies by soil temperature measurements. Presented here is a yearlong series of data (from September 1st 2010 to August 31st 2011) allowing for an assessment of temperatures in the root horizon of the plants, as well as the duration of snow cover and vegetation period. The paper at hand integrates the results of the three subprojects and discusses the complex nature of the vegetation development in the foreland of Schwarzenbergferner in regard to time since deglaciation, altitude, length of vegetation period and soil temperatures.

I. Einleitung

Gletschervorfelder sind gemäß FFH-Richtlinie der EU (1992) extreme und ausgesprochen sensible, natürliche Lebensräume, die zusammen mit den permanenten Gletschern als FFH-Lebensraumtyp *Gletscher und permanente Schneefelder* (LRT 8340; amtliche Kartierungshinweise: Das unmittelbare Gletschervorfeld mit den jüngsten Grund- und Endmoränenzügen sollte bei der Gebietsabgrenzung mit eingeschlossen werden. (BfN 1998: S. 322), s. a.: http://www.bfn.de/0316_typ8340.html; ELLMAUER & TRAXLER 2000: S. 127) von allgemeinem gemeinschaftlichem Interesse sind und wie die angrenzenden *Alpinen Heiden* (LRT 4060) und *Grasländer* (LRT 6150) unter besonderem Schutz stehen (BAY LFU & BAY LWF 2010). Für deren Erhaltung sind gemäß Art. 3 und 4 der FFH-Richtlinie für das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000 besondere Schutzgebiete auszuweisen. Zugleich eignen sich die Gletschervorfelder in besonderer Weise um die Besiedlungsdynamik und Vegetationsentwicklungen auf zuvor unbesiedelten Standorten zu untersuchen. ELLENBERG (1996, S. 633) hat es treffend formuliert: "Nirgends kann man Sukzessionen besser studieren als auf den Vorfeldern großer Gletscher".

Studien zur Vegetationsentwicklung in Gletschervorfeldern der Alpen haben eine lange Forschungstradition und reichen bis ins vorletzte Jahrhundert zurück (u.a. KERNER VON MARILAUN 1863, COAZ 1887, KLEBELSBERG 1913, FRIEDEL 1938, GAMS 1939, LÜDI 1945, 1958) und sind auch heute im Zuge der beschleunigten Klimaerwärmung mit zum Teil extremen Veränderungen im Eishaushalt (vgl. *WGMS* 2008) hochaktuell. Ein geläufiges Verfahren die Pflanzensukzession in Gletschervorfeldern zu untersuchen sind Chronosequenzen ("space for time substitution" im Sinne PICKETT's 1989), bei denen aus einem räumlichen Nebeneinander unterschiedlicher Standorte ein zeitliches Nacheinander abgeleitet wird (vgl. MATTHEWS 1992). Im Falle der Sukzession in Gletschervorfeldern wird dabei i.d.R. auf Spuren datierbarer Gletscherstände zurückgegriffen. Es liegt also die Annahme zugrunde, dass mit wachsender Entfernung zum Gletscherterminus der Zeitpunkt des Eisfreiwerdens länger zurückliegt und damit Flächen in unterschiedlichen Sukzessionsstadien angetroffen werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil in kurzer Zeit handfeste Daten hervorzubringen – in unserer immer ungeduldiger werdenden (Wissenschafts)Welt ein nicht von der Hand zu weisender Vorteil – und es ist auch durchaus geeignet, Unterschiede in der Artenzusammensetzung und der Vegetationsstruktur auf diesen Flächen aufzudecken. Allerdings muss man sich darüber im Klaren sein, dass bei diesem Verfahren unterschiedliche Flächen mit potentiell unterschiedlichen abiotischen Standortfaktoren (z.B. Hangneigung, Höhenlage, Exposition), abweichender Störungshistorie und variierenden Verhältnissen hinsichtlich potentieller Samenquellen im weiteren Umfeld untersucht werden und damit auch andere Faktoren als nur die Dauer

der Eisfreiheit von Bedeutung sein können. Generell ist in alpinem Terrain mit der Dauer der Eisfreiheit fast immer auch eine Veränderung der Höhenlage verbunden, was wiederum einen Wandel der mikroklimatischen Bedingungen (Schneedeckendauer, Dauer der Vegetationsperiode, Veränderung der Luft- und Bodentemperaturen, etc.) annehmen lässt und damit alternative Erklärungsansätze anbietet. Der vorliegende Beitrag will anhand verschiedener Einflussfaktoren die multikausalen Hintergründe der Vegetationsentwicklung in Gletschervorfeldern am Beispiel des Schwarzenbergferners in den Stubaier Alpen diskutieren.

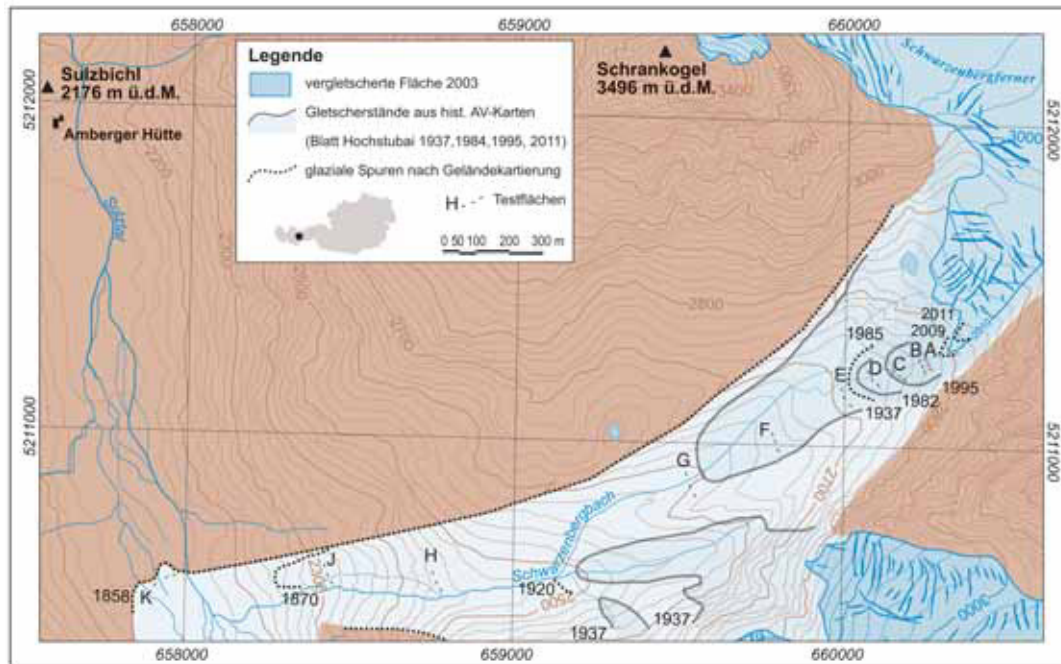


Abb. 1: Das Vorfeld des Schwarzenbergferners mit rekonstruierten Eisrandlagen der letzten eineinhalb Jahrhunderte und Lage der Testflächen der vegetationskundlichen Untersuchungen.

2. Untersuchungsraum

Der Schwarzenbergferner erstreckt sich von der Südostflanke des Schrankogels (3497 m ü.d.M., UTM 32T E: 659431 N: 5212216) in Richtung Sulztal, einem Nebental des Ötztals in den ostalpinen Zentralalpen Tirols (Österreich). Der aktuelle (2011) Gletscherterminus liegt südwestexponiert bei etwa 2830 m ü.d.M. (vgl. Abb. 1). Von hier erstreckt sich das seit dem Höchststand der Kleinen Eiszeit freigegebene Gletschervorfeld über gut 2 Kilometer und 600 Höhenmeter in südwestlicher bis westlicher Richtung bis zu einem markanten Moränenbogen, der die Lage der damals noch vereinigten Gletscherzunge von Schwarzenbergferner und Sulztalferner zum Höchststand der Kleinen Eiszeit um 1858 markiert (Abb. 2). Das Obere Sulztal liegt im von der EU-Kommission anerkannten Natura 2000-Gebiet "Ruhegebiet Ötztaler Alpen",³ in dem explizit der LRT 8340 aufgeführt ist.

Die Ötztaler und Stubaier Alpen, in deren Übergangsbereich der Schrankogel liegt, gehören dem ostalpinen Kristallin ("Ötztal-Stubai-Komplex") an (vgl. KRÄINER 2010), das heute als Teil des oberostalpinen Deckensystems gesehen wird und sich in drei lithologische Einheiten gliedert. Den Haupt-



Abb. 2: Der von den anastomisierenden Gletscherabflüssen im oberen Sulztal angeschnittene Endmoränenwall, der den zum Maximalstand der Kleinen Eiszeit 1858 noch vereinigten Gletscherterminus des Schwarzenbergferners und des von Süden kommenden Sulztaferners markiert. (Foto: Thomas Fickert, 08/2010).

teil bilden altkristalline Paragneise und Glimmerschiefer, die Spuren mehrerer Metamorphoseereignisse (kaledonisch, variszisch, alpidisch) aufweisen.

Makroklimatisch betrachtet liegen die Alpen im Übergangsbereich vom gemäßigten mitteleuropäischen Klima im Norden zum mediterranen Klima im Süden. Als ausgeprägte topographische Barriere rufen sie sowohl bei nördlich/nordwestlichen als auch bei südlich/südwestlichen Luftströmungen Stauniederschläge an den Außenflanken hervor (VEIT 2002). Die kontinentaleren zentralen Bereiche verzeichnen gegenüber den Randalpen in allen Höhengniveaus deutlich geringere Niederschlagsmengen und höhere Strahlungssummen. Das Inntal und die unteren Talabschnitte seiner Seitentäler stellen typische Vertreter inneralpiner Trockentäler dar, wie das Klimadiagramm von Umhausen im unteren

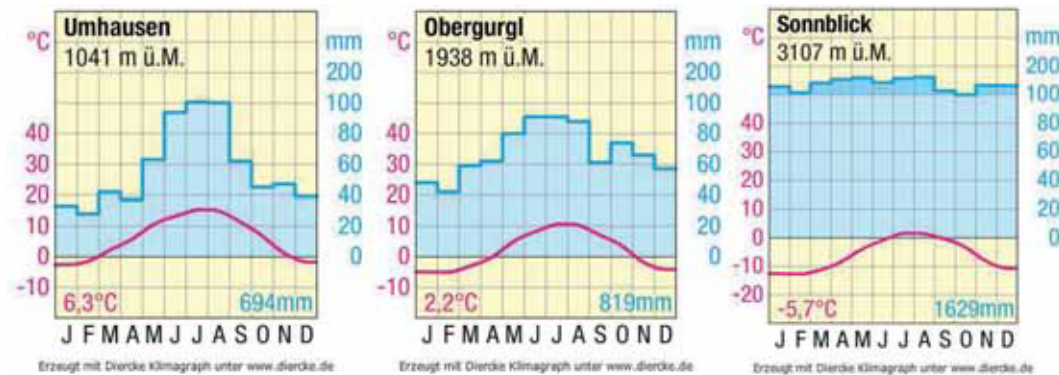


Abb. 3: Klimadiagramme aus den Zentralalpen; die Station Umhausen (Ötztal) repräsentiert die inneralpiner Trockentäler, die Station Obergurgl (Ötztal) die Klimasituation im Bereich des Waldgrenzökotons und die Station Sonnblick (Hohe Tauern) soll als Anhaltspunkt für die Klimabedingungen im Bereich der rezenten Gletscherzunge des Schwarzenbergferners dienen.

ren Ötztal belegt (Abb. 3). Die Station Obergurgl (1938 m ü.d.M.) im hinteren Ötztal kann als repräsentativ für die Klimabedingungen am unteren Ende der hier vorgestellten Chronosequenz herangezogen werden, während die Station Sonnblick (3107 m ü.d.M.) in den Hohen Tauern, ca. 140 km östlich des Schwarzenbergferners gelegen, als Anhaltspunkt für die Klimabedingungen im rezenten Gletschervorfeld dienen soll (Abb. 3).

Die sich mit zunehmender Höhe verändernden Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse rufen eine ausgeprägte vertikale Differenzierung der Vegetation, der Böden und der Morphodynamik hervor. Der Untersuchungsraum liegt in der alpinen bis subnivalen Höhenstufe, wobei anzumerken ist, dass die tiefsten Lagen im Bereich der 1850er Endmoräne bereits potentiell Waldstandorte der subalpinen Nadelwaldstufe darstellen und das weitgehende Fehlen von Bäumen in diesem Höhengiveau wohl auf anthropogenen Einflüssen in der Vergangenheit beruht (vgl. hierzu auch JANDL et al. 2012). Die alpine Stufe mit ihren (Zwerg)Strauchbeständen und alpinen Matten erstreckt sich von der Baumgrenze (ca. 2000 bis 2100 m ü.d.M. im Sulztal) bis hin zur Obergrenze der alpinen Rasen, die in den Zentralalpen lokal bis 2800 m ü.d.M. ansteigen können und von Rasengesellschaften mit an Wärmemangel und lange Schneedeckendauer angepassten Arten gebildet werden. Oberhalb schließen sich subnivale Schuttfuren an, in denen noch fleckenhaft Elemente der alpinen Matten, zahlreiche Polster- und Rosettenpflanzen sowie Rohbodenpioniere mit geringen Deckungswerten auftreten. Diese Pioniere reichen an begünstigten Stellen bis in die nivale Stufe, wo ansonsten epilithische Flechten vorherrschen.

Eine mit steigender Höhenlage nachlassende Bodenbildung auf Grund verringerter chemischer Verwitterung, Mineralisierung, Humifizierung, geringer Alkalinität, niedriger pH-Werte und verstärkter physikalischer Verwitterung hat zur Folge, dass höhenwärts sukzessive schwächer entwickelte Böden anzutreffen sind. In der subnivalen Stufe der Zentralalpen sind zumeist flachgründige Rohböden über Frostschutt zu finden. In der alpinen Stufe sind alpine Ranker anzutreffen, in entsprechenden Lagen auch alpine Pseudogleye, Pararendzinen, Podsole oder gar Braunerden (vgl. VEIT 2002, SCHWIENBACHER & KOCH 2010).

Im unvergletscherten periglazialen Bereich der Zentralalpen oberhalb der Waldgrenze zeigen neben gravitativen und fluvialen Formungsprozessen vor allem die aufgrund der kaltklimatischen Bedingun-



Abb. 4: Blick aus dem Vorfeld des Schwarzenbergferners ins gegenüber liegende Roßkar mit seinen mächtigen Blockgletschern. (Thomas Fickert, Sept. 2011).

gen saisonal und/oder tageszeitlich auftretenden Fröste ihre morphodynamische Wirksamkeit in Form kryptoturbativer und solifluidaler Bodenbewegungen. Auch Permafrost ist weit verbreitet, wie zahlreiche Blockgletscher im oberen Sulztal belegen (vgl. Abb. 4, siehe auch KRAINER 2010 für das obere Ötztal).

3. Untersuchungs- und Auswertemethodik

Die Rekonstruktion der Vereisungsgeschichte im Vorfeld des Schwarzenbergferners seit dem Ende der Kleinen Eiszeit beruht auf verschiedenen Grundlagen (vgl. LOHER 2012). Zunächst erfolgte eine Auswertung historischer Alpenvereins-Karten aus den Jahren 1937, 1984, 1995 und 2005. Für die Jahre ab 1967/68 konnte zusätzlich auf die Gletschermessberichte des Österreichischen Alpenvereins zurückgegriffen werden (OeAV). Im Gelände wurden die auf Vorstoß- und/oder Stagnationsphasen vorzeitlicher Gletscher zurückgehenden Moränen kartiert, GPS-vermessen und zur Datierung mit existierenden Kartierungen aus den Zentralalpen in Verbindung gebracht (u.a. HEUBERGER 1966, DAMM 1996, BÖHM et al. 2007).

Zur zeitlichen Einordnung von Standorten, die nicht über Moränenlagen datierbar waren, wurden lichenometrische Untersuchungen durchgeführt (vgl. BESCHEL 1950, 1957, FREY 1959, INNES 1985, GÜNZL et al. 2000). Das Verfahren der Altersbestimmung durch Lichenometrie beruht darauf, dass Flechten nach ihrer Ansiedlung auf vom Eis freigegebenem und stabil gelagertem Felsblöcken – dafür vergehen in der Regel einige Jahrzehnte – ein weitgehend lineares Wachstum der Flechtendurchmesser aufweisen (je nach Standort 0,1 bis 0,5 mm/a). Anhand von Standorten mit bekannter Dauer der Eisfreiheit (d.h. markante, für die gesamten Ostalpen nachgewiesene und datierte Moränenlagen) lässt sich eine Wachstumsgerade erstellen, in die dazwischen liegende, undatierte Flechtenstandorte eingehängt werden können und so das Alter dieser Standorte abgeschätzt werden kann. Für die lichenometrischen Erhebungen wurde pro Standort an fünf Felsblöcken der maximale Durchmesser von jeweils fünf Exemplaren der Landkartenflechte (*Rhizocarpon geographicum*) gemessen und aus diesen Werten die Wachstumsfunktion erstellt.

Die Aufnahmemethodik für die vegetationskundlichen Untersuchungen orientiert sich an PAULI et al. (2004). Die Chronosequenz umfasst insgesamt 10 Stadien der Dauer der Eisfreiheit (zwischen 5 (A-Flächen) und gut 150 Jahren (K-Flächen), zur Lage siehe Abb. 1). Im August 2009 wurden die Flächen A bis F, im August 2010 die Flächen G bis K aufgenommen. Pro Stadium wurden drei 10 m² Flächen (2 x 5m) untersucht, wobei alle Gefäßpflanzen und bodenbewohnenden Flechten mit ihren jeweiligen Deckungswerten aufgenommen wurden. Die Moose wurden undifferenziert mit ihrem Gesamtdeckungswert berücksichtigt. Die Nomenklatur der Gefäßpflanzen folgt FISCHER et al. (2005). Die Aufnahmen erfolgten quadratmeterweise, anschließend wurden die zehn Einzelflächen von je einem Quadratmeter für die Gesamtflächen (10 m²) gemittelt. Da in den frühen Sukzessionsstadien z.T. sehr geringe Deckungswerte auftreten, wurden keine Schätzskalen wie jene von BRAUN-BLANQUET (1964) oder LONDO (1974) verwendet, sondern es wurden prozentuale Deckungswerte geschätzt, wobei als kleinste Einheit 0.01% berücksichtigt wurde (entspricht einer Deckung von 1x1 cm auf einem Quadratmeter). Allen Arten wurde anschließend der entsprechende Lebensform-Typ nach RAUNKJÆR (1934) zugewiesen, Angaben zur Verbreitungsbiologie der Arten wurden MÜLLER-SCHNEIDER (1986) entnommen.

Um Zusammenhänge zwischen dem Arteninventar ausgewählter Standorte und den zugrundeliegenden Standortfaktoren aufzudecken, bieten sich multivariate Analysemethoden und hier vor allem die Ordinationsverfahren an. Sie haben zum Ziel, Gradientstrukturen in Vegetationsdatensätzen sicht-

bar zu machen und die zugrunde liegenden ökologischen Faktoren darzustellen (vgl. DIERBEN 1990). Die Vegetationsdaten wurden für die vorliegende Untersuchung unter Verwendung des Programms CANOCO 4.5 (vgl. TER BRAAK & ŠMILAUER 2002) einem indirekten unimodalen Ordinationsverfahren unterzogen (Correspondence Analysis CA). Dabei wird durch senkrecht zueinander stehende Achsen ein vieldimensionaler Raum aufgespannt. Da die resultierende "Hyperpunktwolke" optisch nicht mehr fassbar wäre, wird unter möglichst naturgetreuer Beibehaltung der Objektabstände die Darstellung auf wenige aussagekräftige Dimensionen reduziert. Graphisch werden CA's als zweidimensionale Streudiagramme abgebildet, wobei die Aufnahmen als Symbole dargestellt werden. Die Lage der einzelnen Aufnahmesymbole im Ordinationsraum gibt Auskunft über ihre Ähnlichkeit zueinander. Erklärende Umweltvariablen werden als Pfeile dargestellt, deren Länge wiederum ein Maß für die Bedeutsamkeit der Variable bei der Auftrennung der Aufnahmen im Ordinationsraum ist. Die Pfeile zeigen vom Koordinatenursprung, der dem Mittelwert der betreffenden Variable entspricht, in die Richtung, in der Aufnahmen mit überdurchschnittlichen Werten der betreffenden Variable liegen; in der entgegen gesetzten Richtung finden sich die Aufnahmen mit unterdurchschnittlichen Werten.

Ergänzt werden die vegetationskundlichen Untersuchungen durch Messungen der Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe, dem Hauptwurzelschicht der meisten Pflanzen (vgl. SEXTL 2012). Die Bodentemperaturen haben sich als leicht zu messende und biologisch aussagekräftige Klimaelemente herausgestellt (GHRIG-FASL et al. 2008, KÖRNER 2003, 2012). KÖRNER (2003, 2012) hat wiederholt auf die Entkopplung alpiner Pflanzen von den Temperaturbedingungen der freien Atmosphäre hingewiesen und betont, dass für niedrigwüchsige Pflanzen in den Hochlagen der Gebirge mit einem hohen Anteil unterirdischer Biomasse die Bodentemperaturen für die Pflanzenphysiologie von großer Bedeutung und vielleicht sogar noch wichtiger als die Lufttemperaturen sind. Nach KÖRNER (2012) stellt 10 cm Bodentiefe einen guten Kompromiss zwischen zu oberflächennahen (starke kurzfristige Schwankungen) und zu tiefen Platzierungen (lange Reaktionsdauer) dar. Verwendet wurden Bodentemperaturlogger des Modells *M-Log 5W* von *GeoPrecision*, die über eine Infrarotschnittstelle direkt an ihrem Standort im Boden ausgelesen werden können, was insbesondere bei länger laufenden Messreihen von Vorteil ist, da der Standort nicht immer wieder durch Ausgraben gestört wird.

Im Folgenden soll eine einjährige Messreihe der Bodentemperaturen in stündlicher Auflösung vom 01. September 2010 bis zum 31. August 2011 für die mikroklimatische Bewertung im Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners herangezogen werden. Platziert wurden die Logger an der jeweils mittleren Testfläche eines jeden Chronosequenz-Niveaus (A II bis K II, vgl. Abb. 1). Da sich die einzelnen Testflächen hinsichtlich ihrer topographischen Standortvorgaben (Hangneigung, Exposition, Beschattung, Mikrotopographie, etc.) kaum unterscheiden, werden die Werte für das jeweilige Höheniveau als repräsentativ erachtet. Mit Ausnahme von Logger B, der kurz vor Ende der Messperiode (11.07.2011) aufgrund schwacher Batterie ausfiel, sind alle Messreihen durchgängig. Die Fehlwerte von Logger B wurden über eine lineare Regression mit dem benachbarten Logger A ($R^2 = 0.9814$) ergänzt. Neben den reinen Temperaturwerten können aus den Logger-Daten auch die Dauer der Schneebedeckung (isotherme Bedingungen zwischen Tag und Nacht) und der Vegetationsperiode (Anzahl Messungen $> 5^\circ\text{C}$), Temperatursummen sowie die Anzahl der Eistage, der Frostwechseltage und der frostfreien Tage abgeleitet werden.

Für den herangezogenen Messzeitraum liegen außerdem Stundenwerte der Luft- und Bodentemperaturen sowie der Niederschläge von der Station Obergurgl (1938 m ü.d.M) wenige Kilometer südlich in vergleichbarer Höhenlage vor (freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Dr. Nikolaus Schallhardt, Alpine Forschungsstelle Obergurgl), die zur Interpretation atmosphärischer Einflüsse auf die Bodentemperaturen herangezogen wurden (vgl. auch SEXTL 2012).

4. Ergebnisse

4.1 Rekonstruktion des Gletscherschwunds im Vorfeld des Schwarzenbergferners seit dem Ende der Kleinen Eiszeit

Die Längenänderung des Schwarzenbergferners über den Zeitraum der letzten 150 Jahre seit dem Ende der Kleinen Eiszeit beträgt ca. 2 Kilometer, wobei sich der Rückzug wie auch andernorts in den Alpen nicht kontinuierlich vollzog, sondern immer wieder von kurzen Stagnations- und/oder Vorstoßphasen unterbrochen war. Abbildung 1 zeigt die Rekonstruktion der jüngeren Vereisungsgeschichte des Schwarzenbergferners seit dem Ende der Kleinen Eiszeit anhand historischer AV-Karten und eigener Vermessungen eindeutiger und datierbarer glazialer Spuren (Moränen des Höchststandes der Kleinen Eiszeit 1858, Stagnations- und Stauchmoränen der 1870er Jahre, 1920er Jahre und 1980er Jahre, vgl. hierzu auch HEUBERGER (1966) für die nördlich an den Untersuchungsraum anschließenden Bereiche der Ötztaler und Stubai Alpen). Für die dazwischen liegenden Bereiche konnte auf Grundlage der beschriebenen lichenometrischen Erhebungen die Dauer der Eisfreiheit abgeschätzt werden (vgl. Abb. 5).

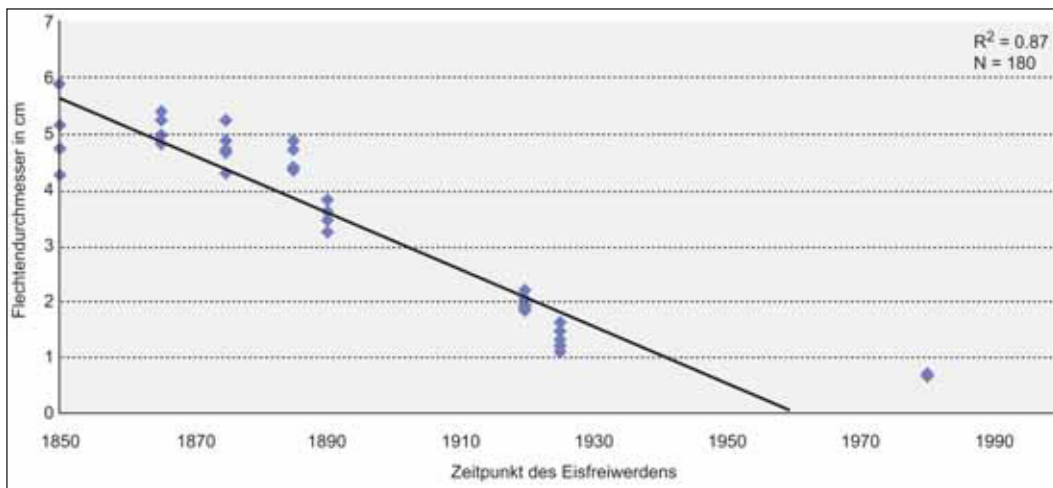


Abb. 5: Wachstumsfunktion der Landkartenflechte (*Rhizocarpon geographicum*).

Für die jüngere Vergangenheit ab dem Winter 1967/68 ermöglichen die Gletschermessberichte des Österreichischen Alpenvereins (OeAV) eine weitere Differenzierung der Längenveränderung des Schwarzenbergferners (vgl. Abb. 6). Neben der durch kühle Sommer und schneereiche Winter hervorgerufenen Vorstoßphase der 1970er bis 1980er Jahre kommen die enormen Längenveränderungen in den letzten beiden Jahrzehnten und insbesondere im Rekordsommer 2003, der in ganz Europa von extrem lang andauernder Hitze gekennzeichnet war, deutlich zum Ausdruck.

Somit ergibt sich eine hoch aufgelöste Chronologie für die letzten eineinhalb Jahrhunderte, über die für die Untersuchungsfläche der Vegetationsentwicklung der Zeitpunkt des Eisfreiwerdens mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann. Für die A-Flächen ist demnach ein Eisfreiwerden kurz nach 2003 anzunehmen, das Alter dieser Flächen betrug zum Zeitpunkt der Datenerhebung (2009) wohl 5 Jahre. Die B-Flächen sind wohl tatsächlich 2003 eisfrei geworden. Für die C-Flächen liegt der Zeitpunkt des Eisfreiwerdens bei knapp 15 Jahren. Die D-Flächen liegen hinter dem markanten Wall des Gletschervorstoßes in den 1980er Jahren. Sie dürften nach Interpretation der Angaben im Glet-

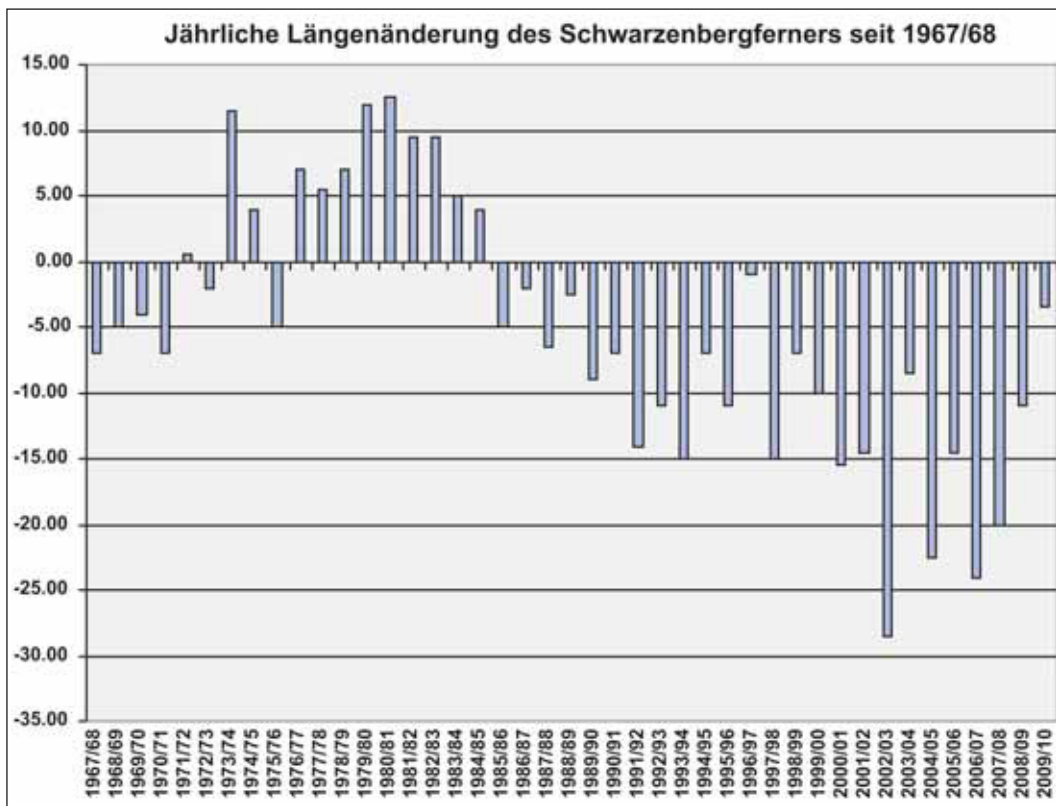


Abb. 6: Längenänderung des Schwarzenbergferners zwischen 1967/68 und 2009/10. (OeAV).

schermessbericht erst einige Jahre nach diesem jüngsten Vorstoß eisfrei geworden sein, was ein Alter von ca. 20 Jahren annehmen lässt. Die Flächen E und F liegen vor dem 1980er Wall und wurden auf 40 respektive 60 Jahre Eisfreiheit datiert. Die folgenden drei Stadien wurden unter Verwendung der Flechtenwachstumskurve auf 80 (G-Flächen), 110 (H-Flächen) und 130 Jahre Eisfreiheit (J-Flächen) datiert, die K-Flächen unmittelbar hinter dem Moränenwall des Höchststandes der Kleinen Eiszeit (1858) sind gut 150 Jahre eisfrei.

4.2 Vegetationsdifferenzierung entlang der Chronosequenz

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist wurden insgesamt 91 Arten von Gefäßpflanzen, 4 terricole Flechten sowie Moos (undifferenziert) entlang der untersuchten Chronosequenz aufgenommen. Die Pflanzenbesiedlung der vom Eis freigegebenen Flächen beginnt bereits nach kurzer Zeit. Nach eigenen Beobachtungen sowie nach Berichten von CANNONE et al. (2008) oder ELLENBERG (1996) sind bereits nach ein bis zwei Jahren Eisfreiheit erste Gefäßpflanzen in den Gletschervorfeldern der Alpen anzutreffen. Zu den frühen Besiedlern ostalpiner Gletschervorfelder gehören u.a. *Arabis alpina* (Alpen-Gänsekresse, Abb. 8a), *Cerastium uniflorum* (Einblütiges Hornkraut, Abb. 8b), *Geum reptans* (Kriechende Nelkenwurz, Abb. 8c), *Oxyria digyna* (Alpensäuerling, Abb. 8d) oder *Saxifraga oppositifolia* (Gegenblättriger Steinbrech, Abb. 8e) sowie die Gräser *Poa alpina* (Alpen-Rispengras, Abb. 8f) und *Poa laxa* (Schlaffes Rispengras), alles Arten, die auch im Vorfeld des Schwarzenbergferners in den frühen Sukzessionsstadien anzutreffen sind. Es handelt sich dabei durchwegs um windverbreitete Arten, die mit gebirgstypischen Lokalwindssystemen aus der Umgebung eingebracht werden. Mit der Zeit gesellen sich

Tab. 1: Gesamtartenliste der im Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners untersuchten Chronosequenz mit Angaben zu Familienzugehörigkeit, Lebensform, primärer Ausbreitungsstrategie (nach MÜLLER-SCHNEIDER 1986), Höhenrang (nach FISCHER et al. 2005, 1 = subnival, 7 = montan) und Deckung (Mittelwert aus drei Aufnahmen pro Chronosequenz-Niveau).

Arten	Familie	LF	primäre Chorie	Höhenrang	mittlere Deckung aus 3 Testflächen pro Niveau										
					A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	
<i>Saxifraga oppositifolia</i>	Saxifragaceae	Ch	boleochor	3	0,0093	0,0073	0,0137	0,0723	-	-	-	-	-	-	-
<i>Saxifraga exarata</i>	Saxifragaceae	Ch	boleochor	3	-	0,0040	-	0,0017	-	-	-	-	-	-	-
<i>Arabis alpina</i> ssp. <i>alpina</i>	Brassicaceae	Ch	boleochor	4	0,0133	0,0133	0,1557	0,0200	0,0010	-	-	-	-	-	-
<i>Ranunculus glacialis</i>	Ranunculaceae	H herb	pterometeochor	1	0,0023	0,0057	0,0073	0,0133	0,0440	0,0500	-	-	-	-	-
<i>Minuartia gerardii</i>	Caryophyllaceae	Ch	boleochor	4	0,0007	0,0033	0,0577	0,0123	0,0137	0,0010	-	-	-	-	-
<i>Linaria alpina</i> ssp. <i>alpina</i>	Veronicaeae	H herb	boleochor	2	0,0067	0,0017	0,0137	0,0100	-	0,0353	-	-	-	-	-
<i>Androsace alpina</i>	Primulaceae	Ch	boleochor	2	0,0003	0,0010	0,0067	0,0083	-	0,0010	-	-	-	-	-
<i>Geum reptans</i>	Rosaceae	H herb	trichometeochor	2	0,0113	0,0043	0,0263	0,3257	0,1320	0,0530	0,2400	-	-	-	-
<i>Oxyria digyna</i>	Polygonaceae	H herb	pterometeochor	2	0,0037	0,0033	0,0263	0,0667	0,0230	0,0507	0,0217	-	-	-	-
<i>Poa laxa</i>	Poaceae	H gram	trichometeochor	2	0,0720	0,0893	0,1490	0,2357	-	-	0,0067	1,4000	-	-	-
<i>Cerastium uniflorum</i>	Caryophyllaceae	Ch	boleochor	2	0,1140	0,1297	0,4490	1,4700	0,2287	0,6740	0,0533	0,0167	-	-	-
<i>Silene acaulis</i> ssp. <i>excarpa</i>	Caryophyllaceae	Ch	boleochor	3	0,0003	0,0003	0,0020	-	-	0,4867	0,2600	0,1200	-	-	-
<i>Poa alpina</i>	Poaceae	H gram	trichometeochor/blastochor (pseudovivipar)	4	0,0633	0,0387	0,1370	0,0833	0,8967	2,0733	1,8167	4,0167	1,5233	-	-
<i>Sagina saginoides</i>	Caryophyllaceae	H herb	boleochor	4	0,0050	0,0130	0,0243	0,0337	0,0440	0,0043	0,1333	0,0940	0,0283	-	-
<i>Sedum alpestre</i>	Crossulaceae	Ch	boleochor	4	0,0033	0,0010	0,0023	0,0027	0,0157	0,1497	0,0783	0,0190	0,0010	-	-
<i>Salix retusa</i>	Salicaceae	Ch	trichometeochor	4	0,0007	-	0,0033	-	-	-	0,1433	-	-	0,5033	-
Moos unbest.	Moos				0,0143	0,0443	0,5720	1,2987	5,5767	0,7347	4,1267	7,7667	6,0333	10,5733	-
<i>Saxifraga bryoides</i>	Saxifragaceae	Ch	boleochor	3	0,0017	0,0133	0,1110	0,2547	0,7780	1,6897	1,4683	0,4967	0,1500	0,1173	-
<i>Leucantheropsis alpina</i>	Asteraceae	H herb	boleochor	2	0,0380	0,0150	0,0210	0,0460	0,1363	0,8767	0,5833	0,3583	0,0740	0,0667	-
<i>Luzula spicata</i>	Juncaceae	H gram	boleochor	4	0,0053	0,0043	0,0007	-	0,0037	0,1667	0,5767	0,3333	0,0067	0,0800	-
<i>Agrostis rupestris</i>	Poaceae	H gram	pterometeochor	4	0,0307	0,0050	0,0350	0,0473	0,0970	0,1467	-	2,0700	0,4567	0,1400	-
<i>Trifolium pallescens</i>	Fabaceae	H herb	pterometeochor	2	-	0,0003	0,0167	-	-	-	0,1000	7,6000	2,8833	0,0167	-
<i>Artemisia mutellina</i>	Asteraceae	Ch	boleochor	4	-	-	0,0017	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cardamine resedifolia</i>	Brassicaceae	H herb	ballochor	3	-	-	0,0033	-	0,0020	0,0230	0,0210	0,0040	0,0007	-	-
<i>Veronica alpina</i>	Veronicaeae	H herb	boleochor	2	-	-	-	0,0003	0,0250	0,0557	0,1947	-	0,0013	-	-
<i>Achillea moenchata</i>	Asteraceae	H herb	boleochor	2	-	-	-	0,0017	-	-	1,2167	2,1600	0,4800	0,1257	-
<i>Pedicularis kernerii</i>	Orobanchaceae	H herb	boleochor	3	-	-	-	-	0,0033	-	-	-	-	-	-
<i>Taraxacum alpinum</i> agg.	Asteraceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	0,0017	0,0180	-	-	0,0167	-	-
<i>Hieracium cf. alpinum</i>	Asteraceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	0,0013	0,0077	-	-	-	-	0,0200
<i>Gnaphalium supinum</i>	Asteraceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	0,0280	0,1230	0,4667	0,0067	0,0300	0,0033	-
<i>Stereocaulon alpinum</i>	Stereocaulaceae	Lichen			-	-	-	-	0,0233	0,0767	2,9133	1,3767	0,9333	6,3167	-
<i>Salix herbacea</i>	Salicaceae	Ch	trichometeochor	3	-	-	-	-	0,0190	0,1110	2,9767	1,1167	0,7933	1,3933	-
<i>Epilobium anagallidifolium</i>	Onagraceae	H herb	trichometeochor	3	-	-	-	-	-	-	0,0807	-	-	-	-
<i>Cerastium cerastoides</i>	Caryophyllaceae	Ch	boleochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0133	0,0100	-	-	-
<i>Luzula alpinopilosa</i>	Juncaceae	H gram	endochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0333	0,8733	-	-	-
<i>Cirsium spinosissimum</i>	Asteraceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	-	-	1,0007	1,8000	0,9933	-	-
<i>Sibbaldia procumbens</i>	Rosaceae	H herb	boleochor	3	-	-	-	-	-	-	0,0167	0,3667	1,3667	-	-
<i>Myosotis alpestris</i>	Boraginaceae	H herb	boleochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0633	1,8867	0,1067	-	-
<i>Trifolium pratense</i> ssp. <i>nivale</i>	Fabaceae	H herb	pterometeochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0333	1,7433	1,3267	-	-
<i>Huperzia selago</i>	Lycopodiaceae	Ch	???	6	-	-	-	-	-	-	0,0017	0,0067	-	-	0,0100
<i>Cladonia rangiferina</i>	Cladoniaceae	Lichen			-	-	-	-	-	-	0,0267	0,0067	-	-	10,7933
<i>Senecio incanus</i> ssp. <i>camoliicus</i>	Asteraceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0200	-	-	-	1,0233
<i>Lycopodium alpinum</i>	Lycopodiaceae	Ch	???	4	-	-	-	-	-	-	0,0433	-	-	-	1,1933
<i>Geum montanum</i>	Rosaceae	H herb	trichometeochor	4	-	-	-	-	-	-	0,0333	-	0,1433	-	-

<i>Homogyne alpina</i>	Asteraceae	H herb	5	-	-	0.0017	-	0.6667	-
<i>Solidella pusilla</i>	Primulaceae	H herb	3	-	-	0.0500	0.0567	0.1100	-
<i>Phleum commutatum</i>	Poaceae	H gram	3	-	-	0.2600	0.5000	0.5667	-
<i>Euphrasia minima</i>	Orobanchaceae	Th	4	-	-	0.5423	0.4540	0.1147	0.1637
<i>Campanula schuchzeri</i>	Campanulaceae	H herb	4	-	-	0.0767	1.4483	0.1183	0.0017
<i>Cetraria islandica</i>	Parmeliaceae	Lichen	4	-	-	0.1767	0.2100	0.1367	4.5000
<i>Rhodiopodium ferngipsum</i>	Ericaceae	Naph	5	-	-	0.2000	2.5000	6.3167	19.9333
<i>Leontodon hispidus</i>	Asteraceae	H herb	5	-	-	0.0500	5.2933	6.1900	0.5933
<i>Salix helvetica</i>	Poaceae	Naph	4	-	-	1.4633	3.6667	2.0233	0.1533
<i>Festuca halleri</i>	Poaceae	H gram	4	-	-	-	0.0133	-	-
<i>Vola c.f. biflora</i>	Violaceae	H herb	4	-	-	-	0.0167	-	-
<i>Carex curvula ssp. curvula</i>	Cyperaceae	H gram	3	-	-	-	0.0567	-	-
<i>unbestimmtes Kraut</i>	???	H herb	???	-	-	-	-	-	-
<i>Salix appendiculata</i>	Salicaceae	Naph	6	-	-	-	0.1000	-	-
<i>Stem. vulgare ssp. vulgare</i>	Caryophyllaceae	Ch	6	-	-	-	0.0667	-	-
<i>Ranunculus villaris</i>	Ranunculaceae	H herb	5	-	-	-	0.4833	0.7733	-
<i>Tritolium badium</i>	Fabaceae	H herb	5	-	-	-	0.5000	0.4667	-
<i>Coelogyssum viride</i>	Orchidaceae	G	5	-	-	-	0.0033	0.0017	-
<i>Cystopteris fragilis</i>	Dryopteridaceae	H herb	5	-	-	-	0.0033	0.0007	-
<i>Botrychium lanata</i>	Ophioglossaceae	G	4	-	-	-	0.0533	0.0133	-
<i>Gentiana brachyphylla</i>	Gentianaceae	H herb	4	-	-	-	0.0783	0.0057	-
<i>Cerastium fontanum</i>	Caryophyllaceae	Ch	4	-	-	-	0.1667	0.0433	-
<i>Gentiana nivalis</i>	Gentianaceae	Th	4	-	-	-	0.3267	0.0173	-
<i>Phytoloma hemisphaericum</i>	Campanulaceae	H herb	4	-	-	-	0.0517	-	0.0117
<i>Sempervivum montanum ssp. montanum</i>	Crossulaceae	Ch	4	-	-	-	0.1133	-	0.0373
<i>Trisetum spicatum</i>	Poaceae	H gram	2	-	-	-	6.5667	3.4333	0.9400
<i>Potentilla aurea</i>	Rosaceae	H herb	4	-	-	-	0.3400	0.9333	0.0367
<i>Plantilla venalis</i>	Ranunculaceae	H herb	3	-	-	-	-	0.0133	-
<i>Agrostis agrostifolia</i>	Poaceae	H gram	4	-	-	-	-	0.0167	-
<i>Barrisa alpina</i>	Orobanchaceae	H herb	4	-	-	-	-	0.0250	-
<i>Solidago virginica ssp. rinvula</i>	Asteraceae	H herb	6	-	-	-	-	0.0333	-
<i>Achillea glabra</i>	Rosaceae	H herb	5	-	-	-	-	0.1333	-
<i>Penicaria virgura</i>	Polygonaceae	H herb	4	-	-	-	-	0.1483	-
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Ericaceae	Ch	6	-	-	-	-	0.2167	-
<i>Doronicum elatum</i>	Asteraceae	H herb	4	-	-	-	-	0.1833	-
<i>Pyrola minor</i>	Pyrolaceae	H herb	6	-	-	-	-	0.4933	-
<i>Alnus atrobetula</i>	Betulaceae	Naph	5	-	-	-	-	0.5000	-
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	Dryopteridaceae	G	7	-	-	-	-	0.3733	-
<i>Salix glaucoscentia</i>	Salicaceae	Naph	4	-	-	-	-	6.8000	-
<i>Deschampsia cespitosa ssp. gaudinii</i>	Poaceae	H gram	3	-	-	-	-	2.3333	-
<i>Lotus corniculatus ssp. alpinus</i>	Fabaceae	H herb	4	-	-	-	-	0.0133	0.0033
<i>Empetrum hemisphaeroidum</i>	Ericaceae	Ch	4	-	-	-	-	2.7667	2.1167
<i>Arnica montana</i>	Primulaceae	H gram	4	-	-	-	-	0.0500	-
<i>Picea abies</i>	Pinaceae	MalPh	6	-	-	-	-	0.0067	0.0500
<i>Vaccinium gauthieroides</i>	Ericaceae	Ch	4	-	-	-	-	4.2500	-
<i>Thamnia vemicularis</i>	Ichthyophylacae	Lichen	4	-	-	-	-	10.3033	-
<i>Primula hirtula</i>	Primulaceae	H herb	5	-	-	-	-	0.1450	-
<i>Loiseleuria procumbens</i>	Ericaceae	Ch	4	-	-	-	-	0.0667	-
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	Ericaceae	Ch	5	-	-	-	-	0.0667	-
<i>Campanula barbata</i>	Campanulaceae	H herb	6	-	-	-	-	0.0733	-
<i>Juniperus communis ssp. nana</i>	Cupressaceae	Naph	4	-	-	-	-	0.3333	-
<i>Fluocetraria nivalis</i>	Parmeliaceae	Lichen	4	-	-	-	-	0.9283	-

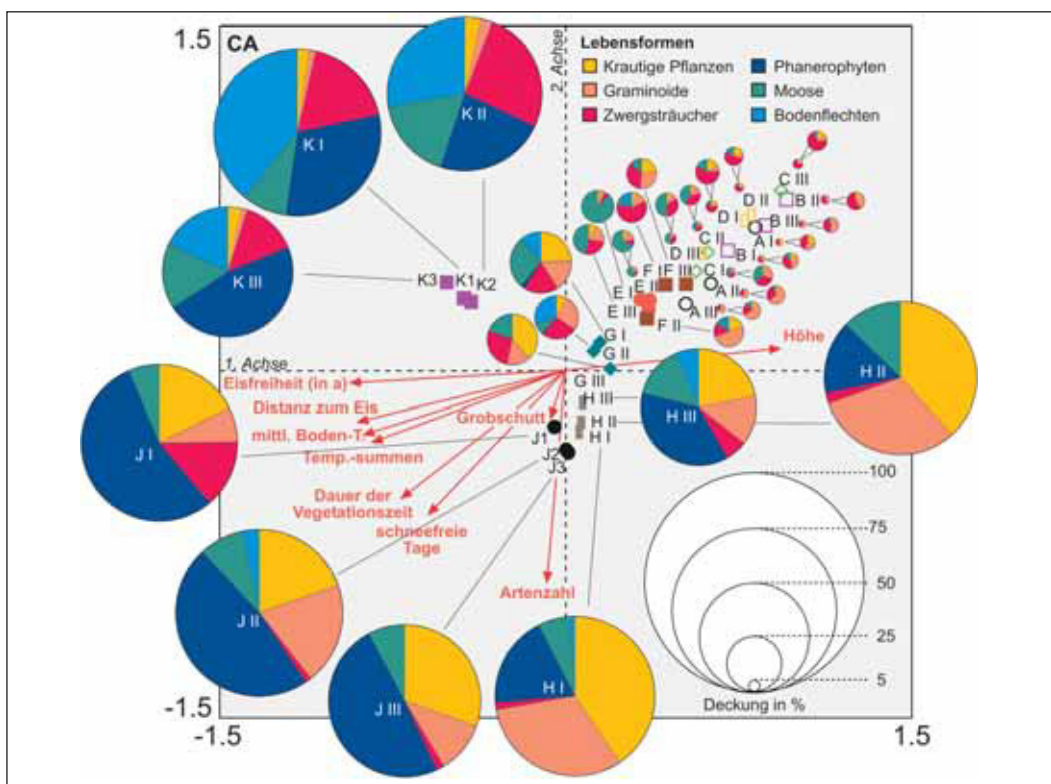


Abb. 7: Korrespondenzanalyse der 30 Einzelaufnahmen entlang der Chronosequenz im Vorfeld des Schwarzenbergferners. Je ähnlicher sich Aufnahmen hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung (unter Berücksichtigung der Deckungswerte) sind, umso näher stehen sie im Ordinationsraum zusammen. Kreisdiagramme geben die Gesamtdeckung und Lebensformzusammensetzung wieder (frühere Stadien z.T. herausgezoomt). Pfeile repräsentieren die Bedeutung verschiedener Standortfaktoren (weitere Erläuterungen siehe Text).

weitere Erstbesiedler hinzu und nach nur fünf Jahren Eisfreiheit finden sich auf den A-Flächen bereits 19 verschiedene Arten von Gefäßpflanzen, was eine rasante Besiedlungsdynamik alpiner Gletschervorfelder belegt. Mit zunehmender Entfernung vom rezenten Gletscherterminus und damit längerer Dauer der Eisfreiheit steigen die Deckungswerte leicht an und erreichen auf den D-Flächen bereits knapp über 5% (vgl. Abb. 7), die Artenzusammensetzung bleibt aber noch nahezu unverändert. Im Grunde können alle Flächen, die bis etwa 2 Jahrzehnte eisfrei sind (Flächen A bis D) diesem "Pionierstadium" zugewiesen werden. Weitere hoch stete Arten neben den oben genannten Pionieren sind *Leucanthemopsis alpina* (Gewöhnliche Alpenmargarite, Abb. 8g), *Sagina saginoides* (Alpenmastkraut), *Ranunculus glacialis* (Gletscherhahnenfuß, Abb. 8h) und *Saxifraga bryoides* (Moos-Steinbrech, Abb. 8i) sowie das Gras *Agrostis rupestre* (Felsen-Straußgras) und die Ährige Hainsimse *Luzula spicata* (Abb. 8j). Diese frühen Pionierstadien sind in der Ordination in Abb. 7 recht stark durchmischt, was die regellose und stark von Zufälligkeit gekennzeichnete Artenzusammensetzung zu Beginn der Besiedlung andeutet. Auffällig in diesem Pionierstadium ist ein hoher Anteil an basisnah verholzten Zwergsträuchern. Moose bleiben zunächst noch unterrepräsentiert und erreichen erst bei einer Dauer der Eisfreiheit von 15 bis 20 Jahren höhere Deckungsanteile. Eine bedeutende fördernde Funktion ("facilitation" im Sinne von CONNELL & SLATYER 1977) für die Besiedlungsdynamik der Flächen (z.B. als Keimbett) besitzen sie

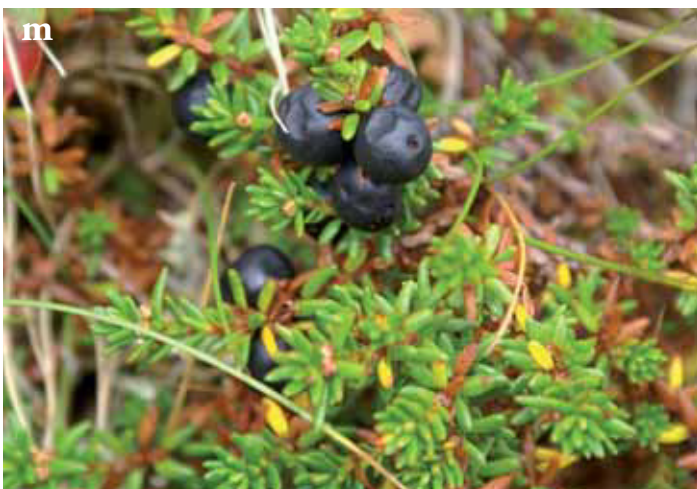
aber offenbar nicht (FICKERT & GRÜNINGER, unveröffentlichte Daten). Beim Zuwachs der Deckungswerte in den frühen Stadien spielen neben kontinuierlichem Sameneintrag (aus der Umgebung aber auch zunehmend auch von etablierten und fruchtenden Individuen auf den Flächen selbst) auch vegetative Ausbreitungsstrategien bestimmter Taxa eine nicht unerhebliche Rolle (vgl. KÖRNER 2003). Zu diesen Arten gehört u.a. *Geum reptans* (Kriechende Nelkenwurz) (Abb. 8c), das neben generativer Vermehrung auch Ausläufer bildet und damit insbesondere in klimatisch ungünstigeren Jahren Zuwachs gewährleistet ist (vgl. WEPPLER et al. 2006). Eine weitere Form der vegetativen (klonalen) Verbreitung repräsentiert das Brutknospen bildende Alpen-Rispengras *Poa alpina* in seiner pseudoviviparen Form (Abb. 8f). Die Ausbildung von Brutknospen bei dieser normalerweise Samen produzierenden Art ist an ungünstige klimatische Standortfaktoren gebunden und gewinnt daher unter den sich höhenwärts verschärfenden Standortbedingungen an Bedeutung (vgl. KÖRNER 2003).

Das Auftreten der Bodenflechte *Stereocaulon alpinum* (Alpine Strunkflechte) (vgl. auch TÜRK & ERSCHBAMER 2010) sowie von Kräutern wie *Gnaphalium supinum* (Niedriges Ruhrkraut), *Hieracium cf. alpinum* (Alpen-Habichtskraut) sowie der Krautweide *Salix herbacea* kennzeichnet ein frühes Sukzessionsstadium (Flächen E und F, bis 60 Jahre eisfrei), in dem sich die meisten der oben genannten Pioniere mit späteren Folgearten vergesellschaften. Mit dem Aussetzen von *Saxifraga oppositifolia* (Gegenblättriger Steinbrech, Abb. 8e) und *S. exarata* (Gewöhnlicher Moschus-Steinbrech) deuten sich bereits erste interspezifische Konkurrenzsituationen an. Hinsichtlich der Gesamtartenzahl pro Fläche (< 20) unterscheidet sich dieses frühe Sukzessionsstadium nicht vom Pionierstadium (Flächen A bis D), die Deckungswerte erreichen aber etwas höhere Werte (Abb. 7). Auf Fläche E I liegen die Deckungswerte bereits bei über 10%, wobei hier der Moosanteil überdurchschnittlich hoch ausfällt (> 87% der gesamten Vegetationsdecke wird von den Moosen gestellt!). Generell ist festzustellen, dass die Moosdeckung auf den E-Flächen ihre höchsten Werte erreicht, während sie zu den späteren Stadien hin wieder abnimmt. In diesem frühen Sukzessionsstadium treten auch erste bodenbewohnende Flechten hinzu, ansonsten zeigt sich weiterhin eine Mischung aus Zwergsträuchern, Gräsern und Kräutern in schwankenden Anteilen.

Artenzahlen und Deckungswerte ändern sich merklich in den späteren Stadien (G-Flächen bis K-Flächen), die sich in Abbildung 7 nun als diskrete Aufnahmegruppen mit einer hohen gruppeninternen Ähnlichkeit und relativer Unähnlichkeit zu anderen Gruppen präsentieren. Auf den ca. 80 Jahre eisfreien Flächen (G-Flächen) fallen weitere Erstbesiedler heraus, darunter *Ranunculus glacialis* (Gletscherhahnenfuß), *Minuartia gerardii* (Gewöhnliche Frühlings-Miere), *Androsace alpina* (Alpen-Mannschild, Abb. 8k) und *Linaria alpina* (Alpen-Leinkraut, Abb. 8l). Im Gegenzug kommen etliche Arten, die auf weniger lang eisfreien Flächen fehlen, hinzu (vgl. Tab. 1), wobei *Cirsium spinosissimum* (Alpen-Kratzdistel), *Euphrasia minima* (Zwerg-Augentrost) und *Festuca halleri* (Hallers Schwingel) als bedeutende Arten hinsichtlich Frequenz und/oder Deckung hervorzuheben sind. Die Artenzahlen pro Fläche liegen z.T. über 30, die Gesamtdeckungswerte erreichen 20 bis 25%. Die Anteile der einzelnen Lebensformen sind relativ ausgeglichen. Dieses Stadium kann als frühe Ausprägung kraut- und grasreicher Initialrasen gewertet werden, die sich dann auf ca. 110 Jahre eisfreien Flächen (H-Flächen) in ihrer typischen Form einstellen (vgl. auch NAGL & ERSCHBAMER 2010). Wichtige Arten sind die Kräuter *Campanula scheuchzeri* (Scheuchzers Glockenblume), *Leontodon hispidus* (Steifhaariger Löwenzahn) sowie verschiedene Klee-Arten (*Trifolium pallescens* (Geröll-Klee), *T. pratense* ssp. *nivale* (Schneeklee), *T. badium* (Braun-Klee)). Unter den Gräsern nehmen *Poa alpina* (Alpen-Rispengras), *Festuca halleri* (Hallers Schwingel) und v.a. *Trisetum spicatum* (Ähriger Grannenhafer) höhere Deckungsanteile ein. Zunehmende Bedeutung erlangen zudem Sträucher, v.a. die Schweizer Weide *Salix helvetica* und die Rostblättrige Alpenrose *Rhododendron ferrugineum*. Die mittleren Artenzahlen liegen bei über 30 und die mittleren Deckungswerte erreichen etwa 60%.



Abb.8: Charakteristische Arten aus dem Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners: a) die Alpen-Gänsekresse (*Arabis alpina*), b) das Einblütige Hornkraut (*Cerastium uniflorum*), c) der Ausläufer bildende Kriechende Nelkenwurz (*Geum reptans*), d) der Alpensäuerling (*Oxyria digyna*), e) der Gegenblättrige Steinbrech (*Saxifraga oppositifolia*) f) das Brutknospen bildende Alpen-Rispengras (*Poa alpina*), g) die Gewöhnliche Alpenmargarite (*Leucan-*



themopsis alpina), h) der Gletscherhahnenfuß (*Ranunculus glacialis*), i) der Moos-Steinbrech (*Saxifraga bryoides*), j) die Ährige Hainsimse (*Luzula spicata*), k) der Alpen-Mannsschild (*Androsace alpina*), l) das Alpen-Leinkraut (*Linaria alpina*), m) die Zwitterige Krähenbeere (*Empetrum hermaphroditum*) und n) die Totengebeinflechte (*Thamnotia vermicularis*). (Fotos: a-d, f-j, l-n: Thomas Fickert, e und k Friederike Grüninger, 08/2009 bis 08/2011).

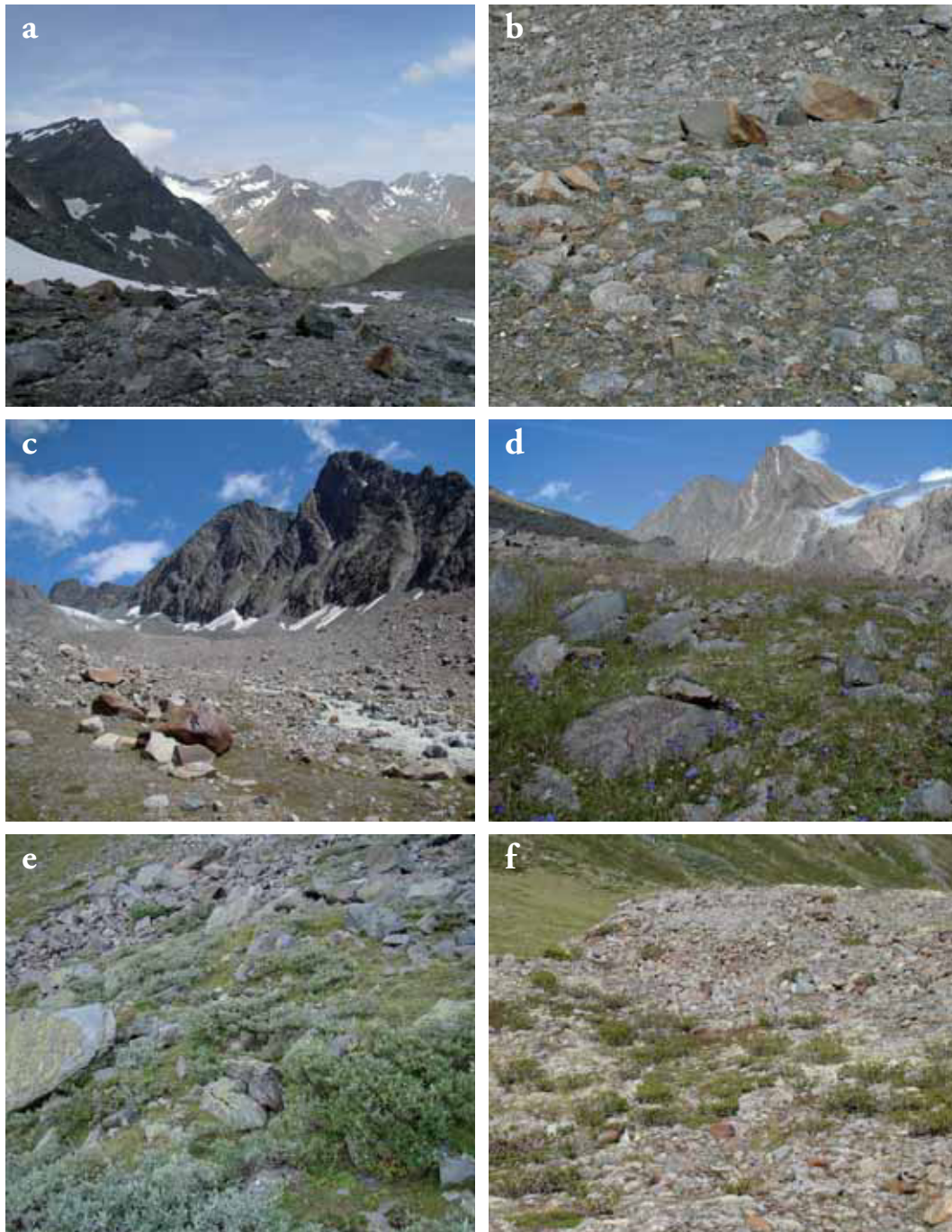


Abb. 9: Vegetationsaspekte aus dem Vorfeld des Schwarzenbergferners: wenige Jahre eisfreie Bereiche mit sehr spärlicher und auf dem Photo nicht wahrnehmbarer Vegetationsausprägung (a); ca. 60 Jahre eisfreie Bereiche mit lückigem frühen Sukzessionsstadium (b); Pionierassen unterschiedlicher Ausprägung auf 80 (c) und 110 Jahre (d) lang eisfreien Flächen; alpine Strauchbestände mit Schweizer Weide (*Salix helvetica*) und Alpenrose (*Rhododendron ferrugineum*) auf 130 Jahre alten Flächen (e); flechtenreiche Zwergstrauchbestände hinter dem markanten Moränenwall des Höchststandes der Kleinen Eiszeit (f). (Fotos: Thomas Fickert, a+b 08/2009, c-f 08/2010).

Das verstärkte Auftreten der Phanerophyten deutet den Übergang zu alpinen (Zwerg)Strauchgesellschaften an, die auf Flächen mit mehr als 100 Jahren Eisfreiheit vorherrschen (J-Flächen, 130 Jahre eisfrei). Etwa die Hälfte der mit 75% recht hohen Gesamtdeckung wird nun von Sträuchern gebildet (vgl. Abb. 7), wobei sich zu den oben genannten Straucharten weitere wie etwa *Salix glaucosericea* (Seiden-Weide) oder *Empetrum hermaphroditum* (Zwittrige Krähenbeere, Abb. 8m) hinzugesellen. Mit über 40 Arten auf 10 m² sind dies auch die artenreichsten Bestände.

Interessanterweise sind nämlich die am längsten eisfreien Flächen (K-Flächen gut 150 Jahre eisfrei) wieder vergleichsweise artenarm und auch die Deckung der Gefäßpflanzen nimmt zu Gunsten der bodenbewohnenden Flechten (darunter die Totengebeinflechte *Thamnomia vermicularis* Abb. 8n) deutlich ab. Gräser und Kräuter fehlen fast völlig und von den frühen Pionieren ist kaum noch etwas zu finden. Dafür kommen etliche subalpine Elemente hinzu, darunter erste kleine Fichtenindividuen (*Picea abies*) oder die Bärentraube (*Arctostaphylos uva-ursi*). Aufgrund ihrer abweichenden Artzusammensetzung (vgl. Tab. 1) sind die K-Flächen in Abb. 7 deutlich von den übrigen Aufnahmen abgesetzt. Die Photos in Abbildung 9 sollen zusammenfassend einen visuellen Eindruck der soeben aufgezeigten unterschiedlichen Vegetationsausprägung der einzelnen Standorte vermitteln.

4.3 Mikroklimatische Messungen

Prinzipiell sind einjährige Messreihen mit Vorsicht zu genießen, da sie von außergewöhnlichen Witterungssituationen gekennzeichnet sein können und so von den mittleren Klimabedingungen, an die die Pflanzen angepasst sind, erheblich abweichen können. Dennoch sind auch solche kurzfristigen Messreihen nicht uninteressant, insbesondere wenn sie zur vergleichenden Betrachtung einzelner Standorte und deren Unterschiede und nicht zur Beschreibung der mittleren Standortbedingungen herangezogen werden (vgl. KÖRNER 2012).

Dass die Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe in enger Koppelung zu den Lufttemperaturen stehen, ist Abbildung 10 zu entnehmen, in der die Luft- und die Bodentemperaturen während der schneefreien

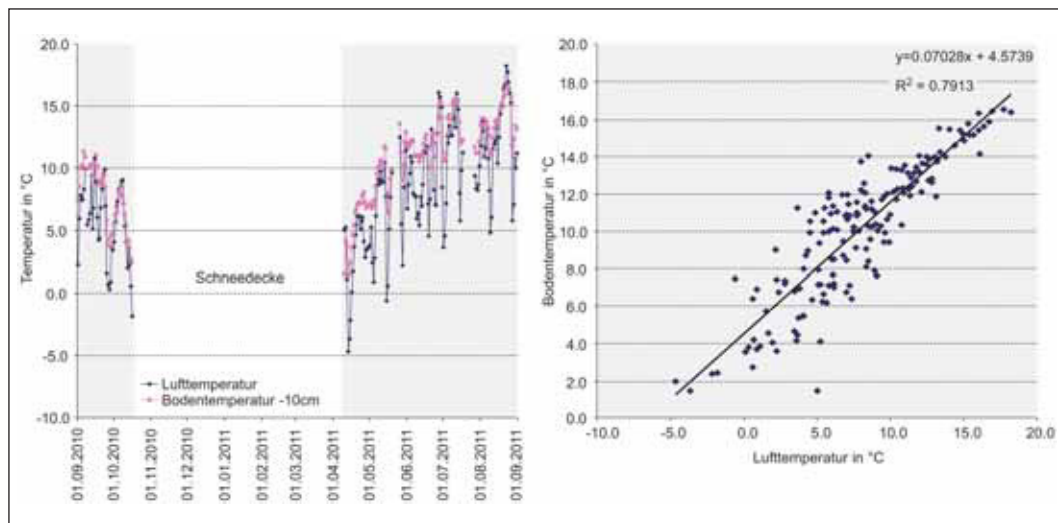


Abb. 10: Luft- und Bodentemperaturen (-10 cm) an der Station Obergurgl für den Messzeitraum von 01. September 2010 bis 31. August 2011. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Bodens reagieren die Bodentemperaturen verzögert auf Erwärmung oder Abkühlung der Lufttemperaturen (links), zeigen aber insgesamt einen gleichsinnigen Verlauf (links) und eine hohe Korrelation (rechts).

Zeit an der Station Obergurgl für die gleiche Messperiode wie im Gletschervorfeld (1. September 2010 bis 31. August 2011) gegenüber gestellt sind. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Bodens reagieren die Bodentemperaturen zwar verzögert auf Erwärmung oder Abkühlung der Lufttemperaturen, zeigen aber eine hohe Korrelation und einen insgesamt gleichsinnigen Verlauf. Auffällig ist die Pufferung gegenüber der nächtlichen Ausstrahlung. Während die Temperaturmaxima von Luft und Boden recht nahe beieinander liegen weichen die Minima im Boden auf Grund der Wärmespeicherkapazität positiv ab, was zu insgesamt deutlich geringeren Temperaturamplituden im Boden führt (Abb. 10).

Abbildung 11a zeigt die Jahresgänge der Mitteltemperaturen aller 10 Logger im Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners, in denen deutlich die Phase der Schneebedeckung in den nahezu isothermen Bedingungen zum Ausdruck kommt. Einem kurzen Schneefallereignis Ende September, das die Temperaturfluktuation für einige Tage unterbricht, folgt am 16. September ein stärkeres Niederschlagsereignis, das mit einer deutlichen Temperaturabsenkung verbunden ist (siehe Lufttemperatur der Station Obergurgl in Abb. 10) und den Aufbau einer beständigen Winterschneedecke einleitet. Zu diesem Zeitpunkt stellen sich an allen Logger quasi-isotherme (d.h. andauernde leichte Abkühlung in der ersten Winterhälfte, kontinuierliche schwache Erwärmung gegen Ende der Schneedecken-Phase und tageszeitliche Schwankungen im 10tel Grad Bereich) Verhältnisse ein. Der Abbau der Winterschneedecke im Frühjahr und Frühsommer vollzieht sich dagegen an den einzelnen Loggern alles andere als synchron. Zwischen dem Zeitpunkt des Ausaperns am frühesten und am spätesten Standort (respektive Logger J II und Logger C II), der sich an den wieder einsetzenden tageszeitlichen Temperaturschwankungen ablesen lässt, liegen mit 53 Tagen immerhin fast acht Wochen. Erwartungsgemäß apert die tieferen Lagen früher aus als die Hochlagen, aufgrund topographischer Bedingungen gibt es jedoch Abweichungen in der höhenwärtigen Ausaperungsabfolge. Insbesondere bei Loggerstandort K II scheint die Tallage mit Kaltluftseenbildung und flach stehender Wintersonne ein längeres Überdauern der Schneedecke zu begünstigen.

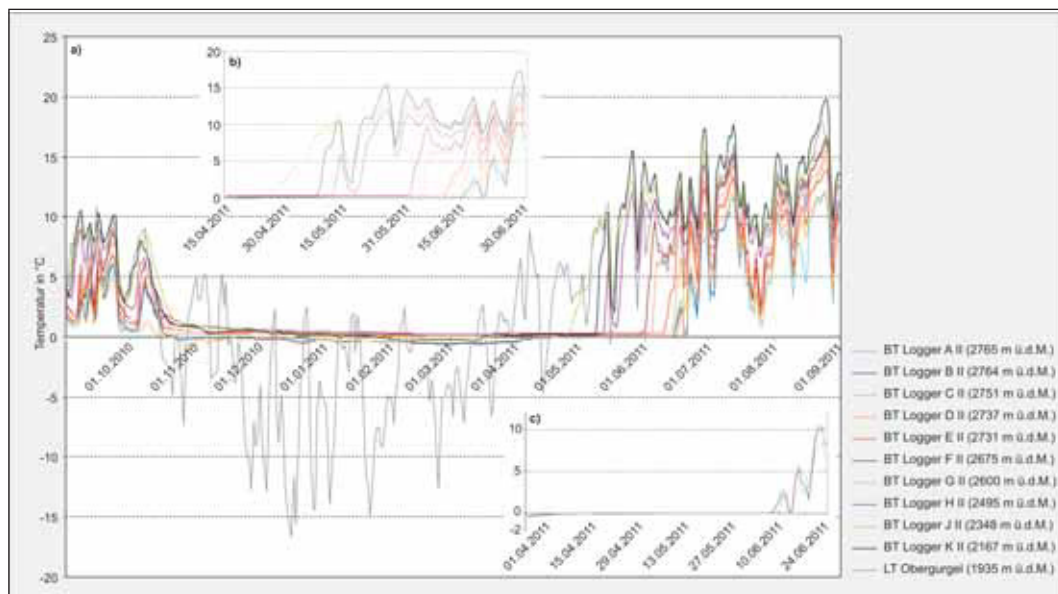


Abb. 11: Jahresgänge (1. September 2010 bis 31. August 2011) der Bodentemperaturen an den zehn Loggerstandorten und der Lufttemperatur an der Station Obergurgl (a); herausgezoomt ist die Ausaperphase aller zehn Bodentemperaturlogger (b), die sich über einen 53 Tage umfassenden Zeitraum hinzieht, sowie der drei höchst gelegenen Logger (c), an denen eine markante Stagnationsphase der Bodentemperaturen um 0°C ersichtlich wird (Erläuterungen siehe Text).

Der vollständige Abbau der Winterschneedecke lässt sich am Einsetzen tageszeitlich fluktuierender Temperaturgänge erkennen (Abb. 11b). Eine vorangegangene Phase relativer Isothermie um 0°C an einigen Logger-Standorten (vgl. Abb. 11c) könnte auf einem als "Zero Curtain Effekt" bezeichneten Phänomen (vgl. WILLIAMS & SMITH 1989) beruhen. Es bezieht sich auf das Freisetzen (Herbst) bzw. den Verbrauch (Frühjahr) von Energie beim Phasenübergang des Bodenwassers von flüssig zu gefroren und umgekehrt, woraus eine temporäre Stagnation der Temperatur um 0°C über Tage bis Wochen resultiert. Solche Zero Curtain Effekte sind aus verschiedenen Gebirgsregionen der Erde beschrieben (z.B. KANE et al. 2001, MUNACK & SCHRÖDER 2009), bei schneereichen Regionen bzw. Standorten sind sie allerdings undeutlich und nur schwer von Isolationseffekten durch die Schneedecke zu unterscheiden (SEXTL 2012). Vergleichbare Effekte können auch durch Verdunstung aus wassergesättigten Böden nach der Schneeschmelze resultieren und sind bei den ohnehin nur schwach negativen Bodentemperaturen einiger Logger im vorliegenden Fall wohl wahrscheinlicher als Zero Curtain.

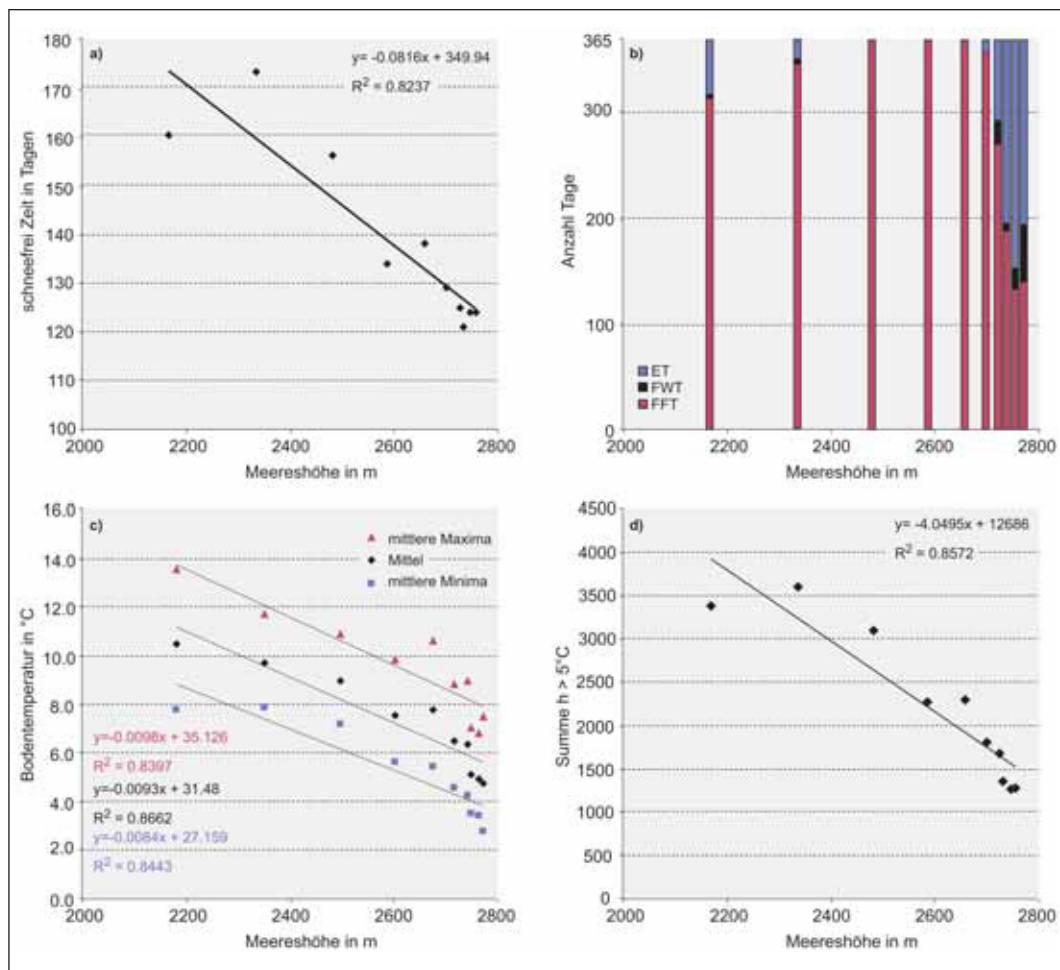


Abb. 12: Vertikalgradienten ausgewählter (bio)klimatischer Kennwerte: Dauer der schneefreien Zeit (a); Anzahl der Eistage, der Frostwechseltage und der frostfreien Tage (b); Bodentemperaturen (Mittel, Minima und Maxima) der schneefreien Zeit (c); Temperatursummen in °h über 5°C (=Summe aller Gradwerte >5°C, d.h. bei einem Stundenwert von 9°C kommen 4K zur Temperatursumme hinzu) (d).

Insgesamt zeigt sich ein ausgeprägter Höhenwandel in der Schneedeckendauer (Abb. 12a). Während die höchsten Standorte nur vier Monate ohne Schneebedeckung aufweisen, verlängert sich die schneefrei Zeit an Standort J (2348 m ü.d.M) um fast zwei Monate. Standort K ist wie bereits erwähnt trotz geringerer Meereshöhe von einem verzögerten Abbau der Schneedecke aufgrund der Tallage mit Überschattung und Kaltluftsammlung gekennzeichnet. Anhand der 10 Loggerstandorte lassen sich aber noch weitere vertikale Klimagradienten ableiten. Abbildung 12b zeigt die Verteilung der frostfreien Tage, der Frostwechseltage und der Eistage. Bemerkenswert ist, dass trotz Höhenlagen von über 2400 m ü.d.M. drei Logger (F, G & H) ausschließlich frostfreie Tage aufweisen. Offenbar sind die Temperaturverhältnisse der schneefreien Zeit so, dass zumindest in 10 cm Tiefe keine Frosteinwirkung mehr auftritt – oberflächennah ist sicher mit schwachen Frösten zu rechnen. Demgegenüber erhöht sich der Anteil an Tagen mit Frosteinwirkung sowohl nach unten als auch noch oben, besonders rapide zu den oberen Standorten (A bis C) hin, obwohl sich die Höhenlage nur minimal verändert. Während Frostwechseltage überall relativ unbedeutend bleiben (dies drückt sich im Übrigen auch im Fehlen markanter kryoturbativer und/oder solifluidaler Oberflächenformen im Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners aus), nehmen insbesondere die Eistage nach oben hin stark zu (auf über 150!). Dies scheint ein Effekt der relativen Nähe zum Gletscherterminus (katabatische Gletscherwinde, evtl. Toteis im Untergrund) zu sein, der sich auch in den insgesamt "unterkühlten" Temperaturen der gletschernahen Standorte bemerkbar macht (Abb. 12c). Auch in den Temperatursummen zeigt sich ein deutlicher höhenwärtiger Wandel (Abb. 12d). Gerade an klimatisch extremen alpinen Standorten ist Wärme für die Lebensprozesse von Pflanzen entscheidend. Nach KÖRNER (2012) stellt 5°C dabei einen kritischen thermischen Schwellenwert für die Pflanzenaktivität dar. Insofern sind die Wärmesummen, also die Gradstunden oberhalb dieses Schwellenwerts, ein wichtiger Indikator für die Zeitspanne günstiger Bedingungen für Pflanzenzuwachs in alpinen Lagen – je höher die Wärmesummen, umso besser. Auch hier kommen die relativ zum Trend unterkühlten Bereiche im unmittelbaren Gletschervorfeld und im Tal bei Logger K zum Ausdruck. Die Werte reichen von über 1000°h im unmittelbaren Gletschervorfeld bis über 3000°h in den tieferen Lagen des hier betrachteten Gradienten. Dies sind – nebenbei bemerkt – Werte, die deutlich über denen beschatteter subalpiner Waldstandorte liegen, womit auch hier die relative thermische Gunst der baumfreien Hochlagen deutlich wird (vgl. KÖRNER 2012).

5. Zur Vegetationsdynamik im Gletschervorfeld im Wirkungsgeflecht von Dauer der Eisfreiheit, Meereshöhe und Bioklima

Zweifellos findet sich im Gletschervorfeld des Schwarzenbergferners eine Abfolge sukzessive länger eisfreier Standorte mit zunehmender Entfernung vom rezenten Gletscherterminus. Betrachtet man in Abbildung 7 die erklärenden Variablen, so lässt sich erkennen, dass die Dauer der Eisfreiheit eine durchaus bedeutende Variable (Pfeillänge!) für die Auftrennung der Aufnahmen im Ordinationsraum ist. Die Daten aus den Bodentemperaturmessungen haben aber auch gezeigt, dass zudem ein ausgeprägter mikroklimatischer Wandel im Gletschervorfeld besteht, der sich unmittelbar aus dem Höhengradienten ergibt. In Abbildung 7 stellen sich zahlreiche weitere bioklimatische Faktoren als ähnlich bedeutsam wie die Dauer der Eisfreiheit heraus, was sich in vergleichbar langen Pfeilen manifestiert. Die nahezu spiegelbildliche Ausrichtung zur Variable Höhe deutet eine hohe Korrelation sowohl der bioklimatischen Faktoren als auch der Dauer der Eisfreiheit mit dieser komplexen Variable an (vgl. Tab. 2). Dies ist wenig verwunderlich, sind doch in einer topographisch stark gegliederten Region wie den Alpen die Gletschervorfelder fast immer auch mit einem Höhengradienten verbunden. Es stellt sich nun die berechnete Frage, ob die Dauer

Tab. 2: Korrelation der erklärenden Variablen; hoch korrelierte Werte über +/- 0.5 sind fett hervorgehoben.

Dauer der Eisfreiheit (in Jahren)	1																				
Grobschuttanteil (> 6cm, in %)	-0.02	1																			
Moos-Deckung in %	0.68	-0.02	1																		
Flechten-Deckung in %	0.69	-0.33	0.48	1																	
Höhe in m	-0.99	0.01	-0.67	-0.65	1																
Distanz zum aktuellen Eisrand	0.96	0.02	0.71	0.58	-0.98	1															
Artenzahl	0.17	0.31	0.07	-0.50	-0.25	0.33	1														
Gesamtdeckung in %	0.48	0.03	0.34	-0.09	-0.56	0.66	0.84	1													
Dauer der schneefreien Zeit (in Tagen)	0.73	0.02	0.43	0.14	-0.79	0.83	0.73	0.89	1												
Temperatursummen	0.94	-0.04	0.62	0.48	-0.96	0.98	0.43	0.72	0.91	1											
mittlere Bodentemperatur in der schneefreien Zeit (in °C)	0.95	-0.02	0.66	0.53	-0.96	0.98	0.36	0.67	0.86	0.99	1										
mittlere Bodentemperaturamplitude in der schneefreien Zeit (in K)	0.54	-0.28	0.34	0.80	-0.47	0.36	-0.67	-0.38	-0.09	0.29	0.35	1									
Dauer der Vegetationszeit (in h > 5°C)	0.83	0.04	0.54	0.26	-0.86	0.91	0.65	0.86	0.98	0.96	0.94	0.03	1								

der Eisfreiheit als primärer Erklärungsansatz für die Vegetationsentwicklung und -differenzierung in Gletschervorfeldern herangezogen werden kann, wie dies in den meisten Chronosequenzstudien geschieht.

Sukzessionen sind i.d.R., zumindest bis zu einem bestimmten Punkt der Entwicklung, von einer Zunahme der Artenzahlen und von steigenden Gesamtdeckungswerten gekennzeichnet. Setzt man diese beiden Merkmale mit der Dauer der Eisfreiheit in Beziehung, erkennt man einen starken nicht-linearen Zusammenhang (Abb. 13). Nach einer etwas verzögerten Entwicklung zu Beginn nehmen die Werte ab gut einem halben Jahrhundert Eisfreiheit rapide zu, bis bei 130 Jahren Eisfreiheit ein Scheitelpunkt sowohl hinsichtlich der Artenzahlen als auch der Deckungswerte erreicht wird. Ob dies tatsächlich ein generelles sukzessionsinternes Phänomen darstellt oder aufgrund besonderer Standortbedingungen der K-Flächen hervorgerufen wird, kann hier nicht abschließend bewertet werden, obwohl die Loggerdaten (vgl. Abb. 12) eine mikroklimatische Sondersituation anzeigen und damit für letztere Annahme sprechen. Unabhängig davon kann die Entwicklung der Artenzahlen und der Deckungswerte hervorragend mit der Dauer der Eisfreiheit erklärt werden, wie die hohen Bestimmtheitsmaße ($R^2 > 95\%$) belegen. Setzt man nun die Artenzahlen und die Deckungswerte aber mit dem Faktor Höhe, der hier als komplexer Proxy verschiedener bioklimatischer Variablen dienen soll, in Beziehung, zeigt sich eine quasi identische Erklärungskraft wie beim Faktor "Dauer der Eisfreiheit" (vgl. Abb. 13).

Dies fordert alternative Interpretationsansätze für die Vegetationsentwicklung in alpinen Gletschervorfeldern heraus, wo ähnliche klimatische Gradienten weitverbreitet sein dürften. Jedenfalls stehen die hier präsentierten Ergebnisse einer generellen Reduktion allein auf den Faktor "Dauer der Eisfreiheit" bei der Interpretation von Vegetationsunterschieden in Gletschervorfeldern deutlich entgegen. Zudem muss die Existenz vertikaler Klimagradienten in Gletschervorfeldern als nur einer von verschiedenen Einflussfaktoren gesehen werden, die für die Vegetationsentwicklung in Gletschervorfeldern von Bedeutung sein können, darunter z.B. folgende:

- Beweidung, die die zoochore Verbreitung von Arten fördert und zu Selektion bestimmter Arten führen kann (vgl. z.B. KRAUSE & FRENZEL 1997).

- hochgebirgsspezifische Morphodynamik mit ihren zahlreichen Störungseinflüssen, die die Sukzession immer wieder auf frühere Stadien zurückwerfen können (vgl. z.B. RICHTER 1994 oder REHBERGER 2002).
- Expositionsunterschiede, die an unterschiedlichen Standorten (d.h. schattige vs. sonnige Talseiten) eine unterschiedliche Artenzusammensetzung hervorrufen, obwohl die Flächen gleich alt sind (vgl. z.B. RAFFL et al. 2006).
- Ausprägung von und Entfernung zu potentiellen Samenquellen, von denen aus die Primärsukzession startet (vgl. z.B. ERSCHBAMER et al. 2001).

Insbesondere letzterer Faktor ist sicher von besonderer Bedeutung, wenn es sich um Chronosequenzstudien über längere Zeiträume handelt. Seit dem Ende der Kleinen Eiszeit hat sich die Temperatur in den Alpen um etwa 2K erwärmt (vgl. CASTY et al. 2005), was in etwa der Schwankungsbreite holozäner Temperaturfluktuationen entspricht. Während die Gletscher unmittelbar und sehr deutlich auf einen derartigen Temperaturanstieg mit Massenverlusten und Längenveränderungen reagiert haben, sind vergleichbare Reaktionen für die Vegetation nicht zu erwarten. Generell hinken die Veränderungen in der Vegetation deutlich hinter den Temperaturveränderungen her und das auch nur bei einem Temperaturanstieg der über der holozänen Schwankungsbreite liegt. Deutliche Vegetationsveränderungen sind beispielsweise für die rasche Temperaturerwärmung am Ende des Pleistozän belegt, als verschiedene Baum- und Straucharten sich innerhalb von nur 200 Jahren um 800 Höhenmeter nach oben verschoben haben (BERTHEL et al. 2012). Während der holozänen Temperaturschwankungen im Bereich von 1 bis 2K blieb dagegen sowohl die alpine Vegetation als auch jene im Bereich des subalpin-alpinen Waldgrenzökotons recht stabil, was pollenanalytische Untersuchungen aus den Alpen belegen (MESSERLI et al. 1978, BERTHEL et al. 2012, KÖRNER 2012). Dies bedeutet, dass die Gletschertermine zahlreicher alpiner Gletscher zum Ende der Kleinen Eiszeit in einer völlig anderen Umgebung

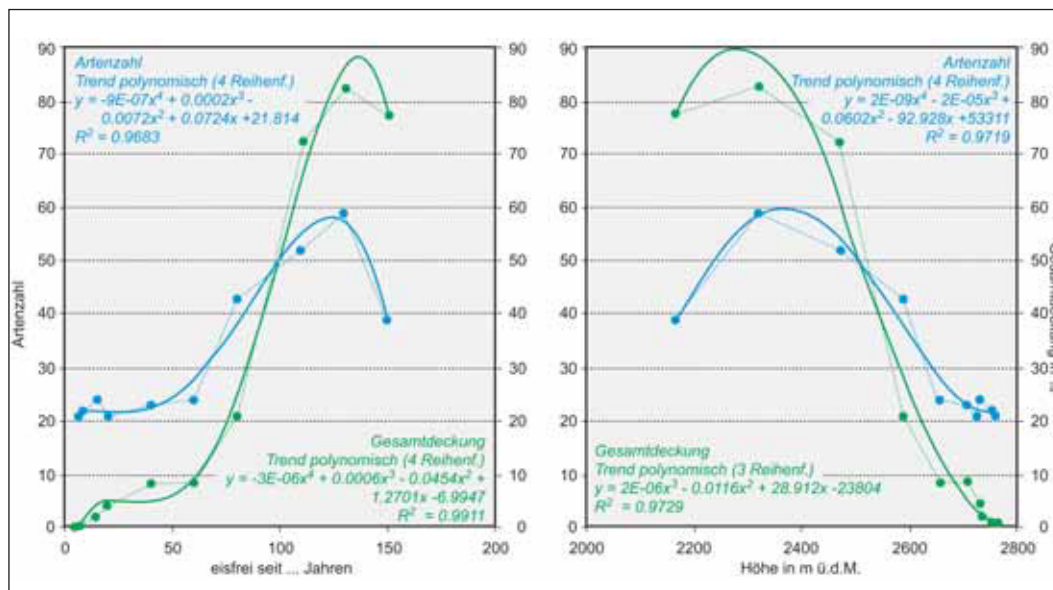


Abb. 13: Entwicklung der Artenzahlen und der Gesamtdeckung im Gletschervorfeld (gemittelt pro Chronosequenz-Niveau) des Schwarzenbergferners in Abhängigkeit von Dauer der Eisfreiheit (links) und der Höhe (rechts). Die Erklärungskraft ist für beide Variablen sehr hoch und nahezu identisch.

lagen als es heute der Fall ist, und dass damit völlig andere Voraussetzungen hinsichtlich potentieller Samenquellen herrschten. Somit ist von deutlich abweichenden Pionierstadien auf den J- oder K-Flächen nach dem Eisfreiwerden nach dem Ende der Kleinen Eiszeit auszugehen, verglichen mit jenen, die sich heute im Gletschervorfeld innerhalb der subnivalen Stufe einstellen.

Mit Chronosequenzen lassen sich demnach durchaus Aussagen zu Unterschieden in der Artenzusammensetzung und der Vegetationsstruktur auf unterschiedlich lang eisfreien Standorten ableiten, bei der Bewertung ist allerdings die Vielfalt unterschiedlicher Einflussfaktoren, die von Gletschervorfeld zu Gletschervorfeld in ganz unterschiedlicher Kombination von Bedeutung sein können, zu berücksichtigen. Interessant wäre in diesem Zusammenhang sicher auch ein Vergleich von Chronosequenzen mit entsprechend lange laufenden Dauerbeobachtungen aus der gleichen Region bzw. – besser noch – dem gleichen Gletschervorfeld. Dies würde eine Beurteilung erlauben, ob sich die in den Chronosequenzen abzeichnenden floristischen und strukturellen Entwicklungen tatsächlich auch in den Dauerbeobachtungsflächen bei entsprechendem Sukzessionsalter zeigen. Aus diesem Blickwinkel heraus sind die A- und die B-Flächen am Schwarzenbergferner als Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet worden, die in regelmäßigem Turnus wieder besucht werden sollen (bisher zwei Wiederholungsaufnahme 2011 und 2013). Sie erlauben möglicherweise, wenn sie denn entsprechend lang fortgesetzt werden, eine solche Beurteilung in der Zukunft.

Literatur:

- BAY LFU & BAY LWF (2010): Handbuch der Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern, 165 S. + Anhang, Augsburg & Freising-Weihenstephan.
- BERTHEL, N., SCHWÖRER, C. & W. TINNER (2012): Impact of Holocene climate changes on alpine and treeline vegetation at Sanetsch Pass, Bernese Alps, Switzerland. In: Review of Palaeobotany and Palynology 174, S. 91–100.
- BESCHEL, R. (1950): Flechten als Altersmaßstab rezenter Moränen. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie Vol. 1, S. 152-161.
- BESCHEL, R. (1957): Lichenometrie im Gletschervorfeld. In: Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und-Tiere, Jg. 22, S. 164-185.
- BÖHM, R., SCHÖNER, W., AUER, I., HYNEK, B., KROISLEITNER, C. & G. WEYSS (2007): Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern, ZAMG, 111 Seiten.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1964): Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde. Springer, Berlin, Wien, New York, 865 S.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BfN) (1998): Das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000-BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG). Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, Heft 53 (Hrsg. BfN), 560 S.
- CANNONE, N., DIOLAIUTI, G., GUGLIELMIN, M. & C. SMIRAGLIA (2008): Accelerating climate change impacts on alpine glacier forefield ecosystems in the European Alps. In: Ecological Applications 18 (3), S. 637-648.
- CASTY, C., WANNER, H., LUTERBACHER, J., ESPER, J. & R. BÖHM (2005): Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. In: International Journal of Climatology 25 (14), S. 1855-1880.

- COAZ, J. (1887): Erste Ansiedlung phanerogamischer Pflanzen auf von Gletschern verlassenen Boden. In: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern, S. 3-12.
- CONNELL, J.H. & R.O. SLATYER (1977): Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. In: *The American Naturalist* 111(982), S. 1119-1144.
- DAMM, B. (1996): Gletscher-, Landschafts- und Klimaentwicklung in der Rieserfernergruppe (Tirol) seit dem Spätglazial. *Göttinger Geographische Abhandlungen* 104, 186 Seiten.
- DIERSEN, K. (1990): Einführung in die Pflanzensoziologie, Darmstadt, 241 S.
- ELLENBERG, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. UTB, Stuttgart, 1095 S.
- ELLMAUER, T. & A. TRAXLER (2000): *Handbuch der FFH-Lebensräume Österreichs*. Monographien Band 130 (Hrsg. Umweltbundesamt Wien), 167 S.
- ERSCHBAMER, B., KNERINGER, E. & R. NIEDERFRINIGER SCHLAG (2001): Seed rain, seed bank, seedling recruitment, and survival of seedlings on a glacier foreland in the Central Alps. In: *Flora* 196, S. 304-312.
- FISCHER, M.A., ADLER, W. & K. OSWALD (2005): *Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol*. Land Oberösterreich, Biologiezentrum der OÖ Landesmuseen, Linz, 1392 S.
- FREY, E. (1959): *Die Flechtenflora und -Vegetation des Nationalparks im Unterengadin, Teil II: Die Entwicklung der Flechtenvegetation auf photogrammetrisch kontrollierten Dauerflächen. – Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen des schweizerischen Nationalparks*. Herausgegeben von der Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalparks Band VI (Neue Folge). Verlag Lüdin, 319 S.
- FRIEDEL, H. (1938): Die Pflanzenbesiedlung im Vorfeld des Hintereisferners. In: *Zeitschrift für Gletscherkunde* 26, S. 215-239. Gams, H. (1939) Die Pflanzendecke der Vendter Täler. In: *Festschrift zum 40jährigen Bestehen des DAV, Zweig Mark Brandenburg*. Bruckmann Verlag, München, S. 56-63.
- GEHRIG-FASL, J., GUISAN, A. & N.E. ZIMMERMANN (2008): Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model. In: *Ecological Modelling* 213, S. 345 – 355.
- GÜNZL, B., FISCHER, P. & M. SCHMIDT (2000): Lichenologische Untersuchungen zur Primärsukzession an Felsblöcken eines Gletschervorfeldes in den Hohen Tauern. In: *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt* 65, S. 167-272.
- HEUBERGER, H. (1966): Gletschergeschichtliche Untersuchungen in den Zentralalpen zwischen Sellrain und Ötztal. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, Heft 20, Innsbruck, 126 S.
- INNES, J.L. (1985): Lichenometry. *Progress in Physical Geography* 9, S. 187–254.
- JANDL, R., SCHINDLBACHER, A., SCHÜLER, S. & D. STÖHR (2012): Wald- und Waldgrenzforschung in Obergurgl – Vergangenheit und Zukunft. In: KOCH, E.-M. & B. ERSCHBAMER (Hrsg.): *An den Grenzen des Waldes und der menschlichen Siedlung*. Alpine Forschungsstelle Obergurgl Band 2, Innsbruck University Press, S. 125-145.
- KANE, D. L., HINKEL, K. M., GOERING, D. J., HINZMAN, L. D. & S.I. OUTCALT (2001): Non-conductive heat transfer associated with frozen soils. In: *Global and Planetary Change*, Vol. 29/3-4, S. 275-292.
- KERNER VON MARILAUN, A. (1863): *Das Pflanzenleben der Donauländer*. Verlag der Wagner'schen Universitäts-Buchhandlung, Innsbruck.
- KLEBELSBERG, R. (1913): Das Vordringen der Hochgebirgsvegetation in den Tiroler Alpen. In: *Österreichische Botanische Zeitschrift* 63: S. 177-186 und 241-254.
- KÖRNER, C. (2003): *Alpine plant life*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 344 S.

- KÖRNER, C. (2012): *Alpine Treelines*. Springer, Basel, 220 S.
- KRAINER, K. (2010): Geologie und Geomorphologie von Obergurgl und Umgebung. In: KOCH, E.-M. & B. ERSCHBAMER (Hrsg.): *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*. Alpine Forschungsstelle Obergurgl Band 1, Innsbruck University Press, S. 31-52.
- KRAUSE, H. G. & B. FRENZEL (1997): Die Entwicklung der Vegetation eines zentralalpiner Gletschervorfeldes seit dem Jahr 1957. In: *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt* 62, S. 189-226.
- LOHER, T. (2012): Die Entwicklung des Sulztal- und des Schwarzenbergferners im Ötztal seit dem Ende der "Kleinen Eiszeit". Unveröff. Abschlussarbeit am Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Passau, 158 S.
- LONDO, G. (1974): The decimal scale for relevés of permanent quadrats. In: KNAPP, R. (Hrsg.): *Sampling methods in vegetation science*. W. Junk Publishers, The Hague/Boston/London, S. 45-49.
- LÜDI, W. (1945): Besiedlung und Vegetationsentwicklung auf den jungen Seitenmoränen des Grossen Aletschgletschers mit einem Vergleich der Besiedlung im Vorfeld des Rhonegletschers und des Oberen Grindelwaldgletschers. In: *Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich*, S. 35-112.
- LÜDI, W. (1958): Beobachtungen über die Besiedelung von Gletschervorfeldern in den Schweizer Alpen. In: *Flora* 146, S. 386-407.
- MATTHEWS, J.A. (1992): *The ecology of recently deglaciated terrain*. Cambridge Studies in Ecology, 386 S.
- MESSERLI, B., MESSERLI, P., PFISTER, C. & H.J. ZUMBÜHL (1978): Fluctuations of Climate and Glaciers in the Bernese Oberland and their Geocological Significance at 1600-1975. In: *Arctic and Alpine Research*, S. 247 – 260.
- MÜLLER-SCHNEIDER, P. (1986): Verbreitungsökologie der Blütenpflanzen Graubündens. Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, Stiftung Rübel H. 85, Zürich, 263 S.
- MUNACK, H. & H. SCHRÖDER (2009): Der Wärmehaushalt periglazialer Hochgebirgsböden – Zusammenhänge zwischen Bodentiefe und Frostwechseln (Nördlicher Tian Shan, Kasachstan). In: *Eiszeitalter und Gegenwart, Quaternary Science Journal*, 58/1, S. 70-85.
- NAGL, F. & B. ERSCHBAMER (2010): Vegetation und Besiedlungsstrategien. In: E.-M. KOCH & B. ERSCHBAMER (Hrsg.): *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*. Innsbruck University Press, S. 121-143.
- OeAV: Gletscherberichte des Österreichischen Alpenverein (für das Jahr 2010/11: http://www.alpenverein.at/portal_wAssets/z_alt/portal/Service/Downloads/Presseausendungen_2012/Downloads/PA_Bergauf_Gletscherbericht.pdf).
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., HOHENWALLNER, D., REITER, K., CASALE, R. & G. GRABHERR (2004): *The Gloria Field Manual – Multi Summit Approach*, Luxembourg, 89 S.
- PICKETT, S.T.A. (1989): Space-for-time substitution as an alternative to long-term studies. In: Likens, G.E. (Hrsg.): *Long-term studies in ecology: approaches and alternatives*, S. 110–135, Springer-Verlag, New York.
- RAFFL, C., MALLAUN, M., MAYER, R. & B. ERSCHBAMER (2006): Vegetation Succession Pattern and Diversity Changes in a Glacier Valley, Central Alps, Austria. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 38/3, S. 421-428.
- RAUNKJÆR, CH. (1934): *The life-forms of plants and statistical plant geography*. Oxford University Press, 632 S.
- REHBERGER, S. (2002): Vegetationsdynamik auf Moränendauerflächen des Grossen Aletschgletschers im Wallis. In: *Geographica Helvetica* 57/3, S. 184-193.

- RICHTER, M. (1994): Die Pflanzensukzession im Vorfeld des Tschierva-Gletschers (Oberengadin). In: *Geoökodynamik* 15, S. 55-88.
- SCHWIENBACHER, E. & E.-M. KOCH (2010): Die Böden eines alpinen Gletschertales. In: KOCH, E.-M. & B. ERSCHBAMER (Hrsg.): *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*. Alpine Forschungsstelle Obergurgl Band 1, Innsbruck University Press, S. 93-119.
- SEXTL, K. (2012): Der vertikale Wandel der Bodentemperaturen und der Schneedeckendauer im Oberen Sulztal (Stubai Alpen, Tirol). Unveröff. Abschlussarbeit am Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Passau, 125 S.
- TER BRAAK, C. J. F. & P. ŠMILAUER (2002): *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide*. Biometris, Wageningen und České Budejovice, 499 S.
- TÜRK, R. & B. ERSCHBAMER (2010): Die Flechten im Gletschervorfeld des Rotmoosferners. In: KOCH, E.-M. & B. ERSCHBAMER (Hrsg.): *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*. Innsbruck University Press, S. 155 – 163.
- VEIT, H. (2002): *Die Alpen – Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. UTB, Stuttgart, 352 S.
- WEPPLER, T., STOLL, P. & J. STÖCKLIN (2006): The relative importance of sexual and clonal reproduction for population growth in the long-lived alpine plant *Geum reptans*. In: *Journal of Ecology* 94, S. 869-879.
- WGMS (2008): *Global Glacier Changes: facts, and figures*. UNEP, World Glacier Monitoring Service, Zürich, 88 S.
- WILLIAMS, P. & M. SMITH (1989): *The Frozen Earth. Fundamentals of Geocryology*. 306 S., Cambridge University Press, Cambridge.

Anschrift der Verfasser:

Thomas Loher, Katharina Sextl, Dr. Friederike Grüninger und Dr. Thomas Fickert
Physische Geographie
Universität Passau
Innstr. 40
94032 Passau
email:
thomas.tiefenbach@freenet.de
katharina.sextl@freenet.de
friederike.grueninger@uni-passau.de
thomas.fickert@uni-passau.de