

Die Vegetationsdifferenzierung auf dem Lehman-Blockgletscher (Snake Range, Nevada, USA) als Indikator der Blockgletscherdynamik

Thomas Fickert & Friederike Grüninger

Universität Passau, Lehrstuhl für Physische Geographie, Innstraße 40, 94032 Passau

1 Einleitung und Fragestellung

Blockgletscher sind charakteristische Mesoformen der periglazialen Höhenstufe, insbesondere semiarider, kontinental-winterkalter sowie winterschneeärmer und strahlungsreicher Hochgebirge (HÖLLERMANN 1983, BARSCH 1988). Es handelt sich um Schutt-Eis-Gemische, die sich aufgrund eines relativ hohen Eisgehalts (40-70 %) der Schwerkraft folgend langsam hang- bzw. talwärts bewegen und i.d.R. Bewegungsraten von wenigen Dezimetern bis wenigen Metern pro Jahr aufweisen. Blockgletscher können dabei Längen von mehreren Kilometern erreichen. Blockgletscher gelten als Indikatoren für die Verbreitung diskontinuierlichen Permafrostes, wobei steile Stirnpartien von 32-40° Neigung rezente Aktivität anzeigen. Sie bilden sich entweder aus Hangschutt durch neu gebildetes Klufteis oder aus Moränenmaterial rezenter oder ehemaliger Gletscher, wobei Toteisreste beteiligt sein können (KLAER 1974, WASHBURN 1979, HAEBERLI 1985, SCHRÖDER 1992, SCHRÖDER et al. 2005). Fließstrukturen sowie „Thermokarst“-Erscheinungen durch das Austauen von subterranem Eis kennzeichnen die Blockgletscheroberfläche, die in der Regel aus grobblockigem Material ('Blockmantel') besteht, während im Inneren feinere Korngrößen vorherrschen. Obwohl es sich aufgrund des hohen Grobmaterialanteils, langsamer Fließbewegungen und oberflächennaher Austauprozesse um wenig günstige Pflanzenstandorte handelt, ist aus verschiedenen Gebirgsregionen der Erde Pflanzenwuchs auf Blockgletschern dokumentiert (GIARDINO et al. 1984, SCHRÖDER et al. 1997, KOKAREV et al. 1997, CANNONE & GERDOL 2003, BURGA et al. 2004, RIEG et al. 2011, GOBBI et al. 2014, GRAßMAIR & ERSCHBAMER 2015, TAMPUCCI et al. 2017). Dem Vegetationsbesatz wird dabei eine ökologische Indikatorfunktion für die Substratstabilität der Blockgletscheroberfläche und damit für die Aktivität des Schutt-Eis-Komplexes zugesprochen (CANNONE & GERDOL 2003).

Auch in den kontinentalen Hochgebirgsräumen der westlichen USA sind Blockgletscher ein weit verbreitetes Phänomen (siehe z.B. WHITE 1971, 1976 oder JANKE 2007 für die Rocky Mountains, MILLAR & WESTFALL 2008 für die Sierra Nevada und OSBORN & BEVIS 2001 für das zwischen der Sierra Nevada und den Rocky Mountains gelegene Great Basin). Im Zentrum des hochkontinentalen semiariden Great Basin liegt die Snake Range, die im Wheeler Peak (3.982 m ü.d.M.) ihren höchsten Punkt erreicht. Auf der Nordostseite des Gebirgszuges liegt in einem pleistozän angelegten Kar das einzige perennierende Firnfeld innerhalb des Great Basin. Da es sich unter seinem eigenen Gewicht verformt und bewegt, kann diese Eisakkumulation auch als sehr kleiner Gletscher angesprochen werden („*glacieret*“, OSBORN & BEVIS 2001). Dem Gletscher vorgelagert ist ein Blockgletscher („Lehman Blockgletscher“, Abb.1), dessen Aktivitätsstatus allerdings unklar ist (vgl. auch VAN HOESEN & ORNDORFF 2011). Der obere Teil hebt sich mit einer steilen Stirn und abrupten Kante von seiner Unterlage ab, was auf rezente Bewegung schließen lässt, obwohl Vergleiche von Photos aus den 1950er und 1970er Jahren mit solchen aus der Zeit des ausgehenden letzten Jahrhunderts keine Verlagerung markanter Blöcke erkennen ließen (OSBORN & BEVIS 2001). Der untere Abschnitt zeigt eine buckelige Oberfläche, eine zugerundete, flachere Stirn aber einen aufgewölbten Querschnitt, was ebenfalls auf eine mögliche Eis-Unterlage, aber insgesamt geringe Aktivität hindeutet (OSBORN & BEVIS 2001). Auch VAN HOESEN & ORNDORFF (2011) äußern sich zögerlich zum Aktivitätsstatus des Lehman Blockgletschers.

In verschiedenen Studien hat sich gezeigt, dass die Vegetation auf Blockgletscheroberflächen als Indikator für Bewegungsraten und Aktivität herangezogen werden kann (CANNONE & GERDOL

2003). Im vorliegenden Beitrag soll daher versucht werden, anhand eines Vegetationstransektes über die gesamte Länge des Lehman-Blockgletschers eine Beurteilung der internen Gliederung des Blockgletschers und seiner Dynamik vorzunehmen.

2 Untersuchungsraum

Die Snake Range ist ein sich in nordsüdlicher Richtung über mehr als 100 km erstreckender Gebirgszug im östlichen Zentral-Nevada ($39^{\circ} 30' N$ bis $38^{\circ} 30' N$), der seinen höchsten Punkt im 3.982 m ü.d.M. hohen Wheeler Peak erreicht. Der Gipfel überragt das Spring Valley ($114^{\circ} 30' W$) im Westen bzw. das Snake Valley ($114^{\circ} 00' W$) im Osten um 2.300 bzw. 2.450 Höhenmeter. Nach den White Mountains im östlichen Kalifornien stellt die Snake Range den zweithöchsten Gebirgszug innerhalb des Intermontan-Raumes zwischen der Sierra Nevada im Westen und den Rocky Mountains im Osten dar. Der Gebirgszug geht als typischer Vertreter der Basin and Range Provinz auf Bruchschollentektonik zurück (ORNDORFF et al. 2001). Vor etwa 5 Millionen Jahren setzten Hebungsvorgänge mächtiger Lagen mariner Sedimente aus dem Präkambrium und Kambrium ein, die dabei nach Osten verkippt wurden. Heute, nach Abtragung der jüngeren Lagen, bilden verwitterungsresistente, präkambrische Quarzite der Prospect Mountain-Formation die höchsten Gipfel. Auf der Nordostseite des Wheeler Peak findet sich in einem pleistozän angelegten, tief eingelassenen Kar der bereits erwähnte einzige Miniatur-Gletscher des Great Basin, dem ein ca. 900 Meter langer Blockgletscher vorgelagert ist (Abb. 1). Lithologisch besteht der Blockgletscher komplett aus Quarziten der Prospect Mountain-Formation, da die steile Kar-Umrahmung das Liefergebiet des groben Verwitterungsschutts darstellt (ORNDORFF et al. 2001).



Abb. 1: Der Lehman Blockgletscher unterhalb des Wheeler Peaks (3.982 m ü.d.M.) in der Snake Range in Ost-Nevada. An der Blockgletscher-Wurzel ist das kleine Firnfeld erkennbar, das die einzige perennierende Eisakkumulation im Great Basin darstellt.

Klimatisch befindet sich die Snake Range in einem Übergangsraum von einem mediterranen Klimaregime mit Winterregen aus pazifischen Tiefs und Sommertrockenheit (Ostpazifisches Hoch) an der Westküste der USA zu einem monsunal geprägten Klimaregime an der Ostflanke der Rocky

Mountains mit Wintertrockenheit (Chinook-Einflüsse) und einem sommerlichen Niederschlagsmaximum, das durch das Einlenken „monsunaler“ feucht warmer Luftmassen aus dem Golf von Mexiko in des Hitzetief über dem Kontinent hervorgerufen wird (WEISCHET 1996, GRÜNINGER 2005, FICKERT 2006, GRÜNINGER & FICKERT 2008). Ost-Nevada im Zentrum des Great Basin ist von beiden Feuchtequellen (Pazifik, Golf von Mexiko) weit entfernt und thermisch wie hygrisch als hochkontinental zu bezeichnen. Die Fußstufen sind trocken und sowohl von westlichen wie monsunalen Luftmassen nur schwach beeinflusst, allerdings macht sich höhenwärts ein ausgeprägter Feuchtegradient bemerkbar.

Die klimatischen Verhältnisse spiegeln sich in der Abfolge verschieden Höhenstufen der Vegetation wider (GRÜNINGER 2005, FICKERT 2006). Die Fußstufen werden von kältetoleranten Strauchsteppen (v.a. *Artemisia tridentata*) eingenommen, die sich bis etwa 2.000 m ü.d.M. hinauf erstrecken. Hohe Anteile eingeschleppter annueller Arten wie *Bromus tectorum* oder *Erodium cicutarium* weisen auf starken Beweidungsdruck hin (vgl. GRÜNINGER 2015). Ab ca. 1.900 m ü.d.M. treten erste niedrigwüchsige Baum-Individuen von *Pinus monophylla* und *Juniperus osteosperma* auf, aber erst oberhalb von 2.000 m ü.d.M. bilden sie echte Offenwälder, mit einem steppenhaften Unterwuchs aus Zwergsträuchern (u.a. *Artemisia arbuscula*) sowie Gräsern (*Elymus elymoides*, *Poa fendleriana*, *Pseudoroegneria spicata*) und Kräutern (u.a. *Arabis holboellii* var. *pinetorum*). Unter zunehmend günstigeren hygrischen Bedingungen stocken oberhalb 2.600 m ü.d.M. Mischwälder mit charakteristischen Nadelbaumarten der Rocky Mountains wie *Abies concolor* var. *concolor*, *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* und *Pinus flexilis* sowie der laubwerfenden Espe *Populus tremuloides*. Bei 3.100 m ü.d.M. erfolgt der Übergang zu „dunkleren“ Nadelwäldern, in denen *Picea engelmannii* und *Pinus flexilis* dominieren. Im gleichen Höhengniveau findet sich auch die extrem hohe Alter erreichende Grannenkiefer *Pinus longaeva*, die in der Snake Range auf vier streng abgegrenzte Lokalitäten konzentriert ist, darunter ein Bestand auf quarzitischem Moränenmaterial im Vorfeld des Lehman-Blockgletschers. Ab 3.400 m ü.d.M. löst sich der Wald in einzelne Bauminseln und krüppelwüchsige Einzelindividuen auf, bis schließlich oberhalb von 3.450 m ü.d.M. vegetationsarme Schuttfluren folgen. Pflanzenwuchs bleibt hier zumeist auf Feinmaterialinseln beschränkt. Die dominierende Art der Schuttfluren ist das größere zusammenhängende Flecken bildende *Geum rossii* var. *turbinatum*, häufig vergesellschaftet mit verschiedenen Gramineen (*Festuca ovina* ssp. *brevifolia*, *Poa rupicola*, *Agropyron scribneri*), Kräutern (*Polemonium viscosum*, *Erigeron leiomerus*, *Draba cana*) und polsterbildenden Zwergsträuchern (*Silene acaulis* var. *subacaulescens*, *Phlox pulvinata*).

3 Datenerhebung und Auswertemethodik

Die Erfassung der Vegetationsausprägung auf der Blockgletscheroberfläche erfolgte entlang eines geschlossenen Band-Transektes, das sich vom unteren Stirnbereich bis knapp unterhalb der Blockgletscherwurzel erstreckt (Abb. 2, vgl. zur Methodik auch MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG 1974). Insgesamt wurden 152 Transektsegmente erhoben, deren Größe jeweils 10 m² (2 m Basis x 5 m Länge) beträgt. In den einzelnen Aufnahmeflächen wurden alle Gefäßpflanzen mit ihren jeweiligen Deckungswerten (in % Bodenbedeckung der Gesamtfläche) aufgenommen. Neben den Gefäßpflanzen wurde die Gesamtdeckung epilithischer Flechten pro Fläche (in %) erhoben sowie der jeweils größte Flechtendurchmesser (in cm) gemessen. Da sich Flechten nur auf ruhendem, stabil gelagertem Schutt ansiedeln und nach ihrer Etablierung ein annähernd lineares Wachstum zeigen, stellen Flechtendurchmesser und Flechtenabundanz gute Indikatoren für die Substratstabilität dar (vgl. BESCHEL 1957, BURGA et al. 2004). Als Standortfaktoren wurde ferner die Neigung der Blockgletscheroberfläche (in °) sowie der Grobblockanteil (in %) in vier Klassen (< 6 cm, 6-20 cm, 20-50 cm, > 50 cm) erfasst. Allen Arten wurden Lebensformen nach RAUNKIAER (1934) zugewiesen, um Aussagen zur Vegetationsstruktur zu ermöglichen. Zudem wurden alle Arten aufgrund

ihrer Wurzelsysteme bestimmten Schuttpflanzen-Typen nach REISIGL & KELLER (1994) zugeordnet. Die Nomenklatur der Arten folgt der *Intermountain Flora* (CRONQUIST et al. 1986; 1995; 1996; 1997a; 1997b; 1998; HOLMGREN et al. 2005, 2012).

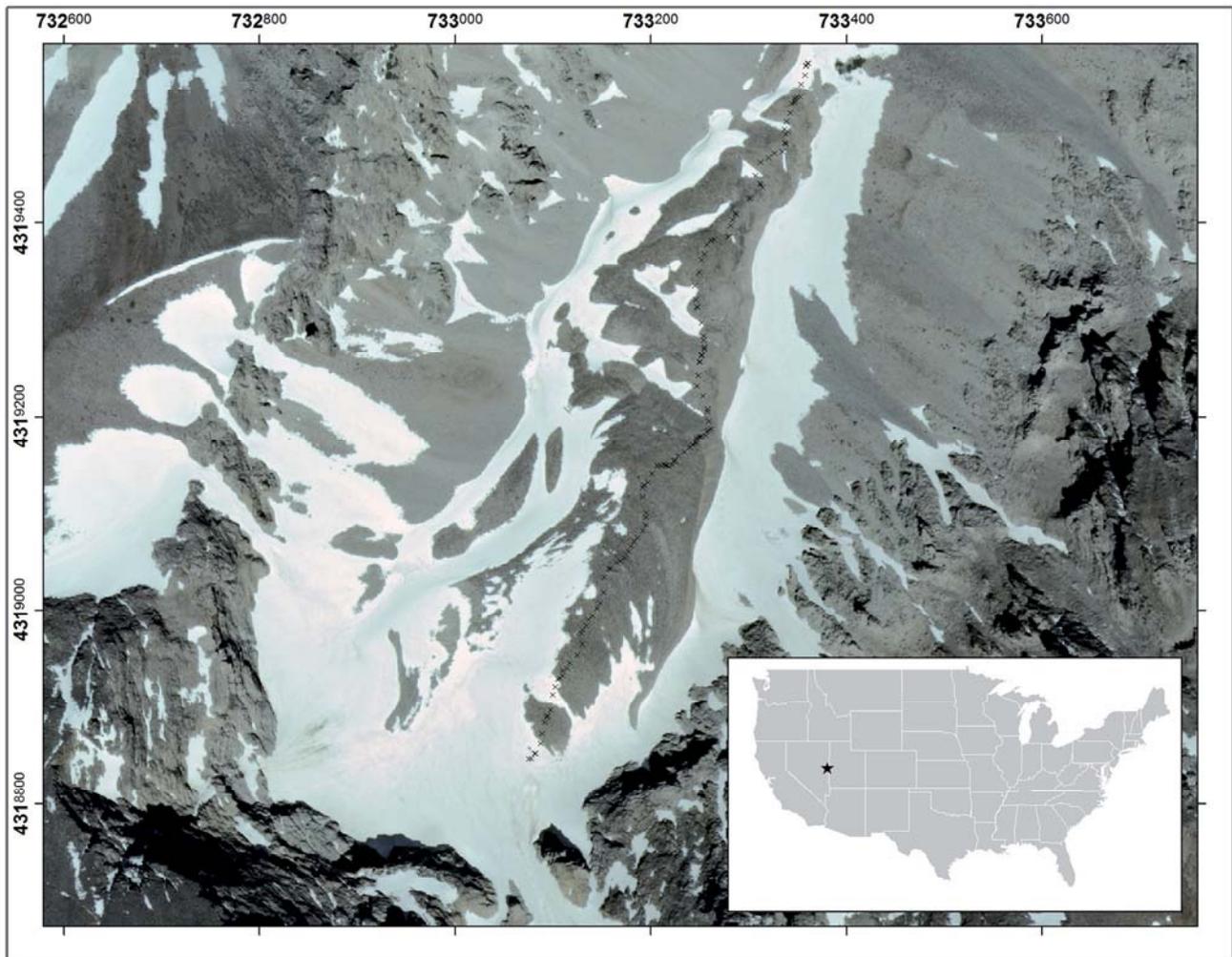


Abb. 2: Luftbild des Lehman Blockgletschers mit GPS-Profil des untersuchten Transektes (Quelle der Kartengrundlage USGS o.J.).

Neben Diagramm-Darstellungen der explorativen Datenanalyse zur Veranschaulichung der Muster der Vegetationsausprägung auf der Blockgletscheroberfläche, wurden die Daten einer multivariaten Gradientenanalyse (Ordination) unterzogen. Ordinationsverfahren helfen, Zusammenhänge zwischen dem Arteninventar ausgewählter Standorte und den zugrundeliegenden Standortfaktoren aufzudecken. Im vorliegenden Fall wurde für die Vegetationsdaten eine Hauptkomponenten-Analyse (*Principal Component Analysis, PCA*) unter Verwendung des Programms CANOCO 5 (vgl. TER BRAAK & ŠMILAUER 2012) gerechnet. Die Hauptkomponentenanalyse ist ein lineares indirektes Ordinationsverfahren, bei dem die Variablen des untersuchten Datensatzes durch lineare Kombinationen zu Hauptkomponenten zusammengefasst werden und so dessen Dimension reduziert wird. Es wird dabei also von einem linearen Verhalten der Arten als Reaktion auf die Veränderung der einflussreichen Umweltfaktoren ausgegangen. Die synthetischen Hauptkomponenten ersetzen die Ausprägungen der Variablen und spannen den Ordinationsraum mit den darin befindlichen Aufnahmesegmenten auf. Die maximale Varianz im Datensatz wird entlang der 1. Hauptkomponente dargestellt, die 2. Hauptkomponenten steht rechtwinklig zu ihr und durchmisst die zweitgrößte Varianz. Die Korrelationen der Arten mit den Hauptkomponenten bestimmen in ihrer Summe deren *Eigenwert*. Der Anteil der Gesamtvarianz auf einer Achse wird als *Prozent erklärter Varianz* ange-

geben, die *kumulative erklärte Varianz* einer errechneten PCA ergibt sich schließlich aus den summierten Anteilen der Achsen. Erklärenden Standortvariablen werden bei PCAs nicht verrechnet, sie dienen lediglich als Interpretationshilfe. Graphisch werden PCAs als zweidimensionale Streudiagramme abgebildet, die Nähe der Aufnahmesymbole im Ordinationsraum zueinander gibt Auskunft über ihre floristische Ähnlichkeit. Die erklärenden Umweltvariablen werden als Pfeile dargestellt, die vom Koordinatenursprung (= durchschnittlicher Wert der Umweltvariablen) in die Richtung zeigen, in der Aufnahmen mit überdurchschnittlichen Werten der betreffenden Variable positioniert sind, in entgegengesetzter Richtung liegen Aufnahmen mit unterdurchschnittlichen Werten. Die Bedeutung der Umweltvariablen spiegelt sich in der Pfeillänge wider, ihre Korrelation mit den Hauptkomponenten dient als Interpretationshilfe.

4 Vegetationsausprägung auf der Oberfläche des Lehman Blockgletscher

Der Lehman Blockgletscher ist eine komplexe zungenförmige Struktur (vgl. Abb. 1 und 2), die sich aufgrund ihrer Oberflächen-Topographie in unterschiedliche Teilbereiche gliedern lässt. OSBORN & BEVIS (2001) unterscheiden ein oberes, wohl erst während der Kleinen Eiszeit gebildetes Segment, von einem unteren, deutlich älteren Abschnitt, für den sie eine Entstehung vor ca. 800-1200 a bp annehmen. Die Autoren vermuten, dass beide Teilbereiche Eis enthalten. VAN HOESEN & ORNDORFF (2011) sprechen von drei deutlich erkennbaren Blockgletscherloben, die ihrerseits von weiteren auf Bewegung hinweisenden Oberflächenstrukturen (Furchen, Rücken, Stirne) gegliedert werden. Ihrer Ansicht nach ist der Blockgletscher aber nicht komplett eisdurchsetzt, vielmehr enthält er einzelne Eis-Linsen, die zu einer räumlich variablen Blockgletscher-Dynamik führen. In der vorliegenden Untersuchung werden aufgrund der Hangneigungen fünf unterschiedliche steilere Stirnbereiche ausgewiesen, an zwei Stellen schneidet das Transekt auch Toteislöcher.

Insgesamt wurden entlang des untersuchten Transektes 26 Gefäßpflanzen aus 21 Gattungen und 14 Familien angetroffen (vgl. Tab. 1 und Abb. 3). Dies erscheint wenig, wenn man sich vor Augen hält, dass selbst auf schuttbedeckten Oberflächen echter Gletscher – also vermeintlich noch ungünstigeren Standorten für Pflanzen – deutlich höhere Artenzahlen erfasst wurden (vgl. z. B. CACCIANIGA 2011, RICHTER et al. 2004 oder FICKERT et al. 2007).

Tab. 1: Artenliste aller auf dem Lehman Blockgletscher entlang des untersuchten Transektes angetroffener Gefäßpflanzen mit Angaben zur Familienzugehörigkeit, der Lebensform (LF) nach RAUNKIAER (1934; Ch = Chamaephyt, H herb = krautiger Hemikryptophyt, H gram = graminoider Hemikryptophyt, HP = Nano-Phanerophyt), zur Abundanz (= Anzahl der Transektsegmente, in denen die jeweilige Art vorkommt) sowie zu Wurzelsystemen und daraus resultierenden Schuttpflanzen-Typen (nach REISIGL & KELLER 1994).

Art	Familie	LF	Anzahl von Segmenten	mittlere Deckung	Wurzelsystem	Schuttpflanzentypen
<i>Erigeron divergens</i>	Asteraceae	H herb	13	0.28	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Erigeron leiomerus</i>	Asteraceae	H herb	29	0.70	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Haplopappus macronema</i>	Asteraceae	Ch	3	0.30	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Draba cana</i>	Brassicaceae	H herb	1	0.05	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Arenaria congesta</i> var. <i>wheelerensis</i>	Caryophyllaceae	H herb	18	1.50	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Carex elynoides</i>	Cyperaceae	H gram	3	5.40	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Cystopteris fragilis</i>	Dryopteridaceae	H herb	1	0.10	Kriechtriebe & Rhizome	Schuttwanderer
<i>Astragalus kentrophyta</i> var. <i>tegetarius</i>	Fabaceae	H herb	20	0.80	Kriechtriebe & Rhizome	Schuttwanderer
<i>Oxytropis parryi</i>	Fabaceae	H herb	21	0.78	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Ribes montigenum</i>	Grossulariaceae	NP	9	15.56	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Agropyron scribneri</i>	Poaceae	H gram	21	0.63	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Festuca ovina</i> var. <i>brevifolia</i>	Poaceae	H gram	34	0.70	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Poa nervosa</i>	Poaceae	H gram	14	0.39	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Poa rupicola</i>	Poaceae	H gram	35	0.71	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Poa sandbergii</i>	Poaceae	H gram	8	0.22	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Trisetum spicatum</i>	Poaceae	H gram	1	0.30	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer
<i>Phlox pulvinata</i>	Polemoniaceae	Ch	32	0.70	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Polemonium viscosum</i>	Polemoniaceae	H herb	28	0.34	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Oxyria digyna</i>	Polygonaceae	H herb	1	0.40	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Androsace septentrionalis</i>	Primulaceae	H herb	1	0.05	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Geum rossi</i> var. <i>turbinatum</i>	Rosaceae	H herb	10	8.10	Kriechtriebe & Rhizome	Schuttwanderer
<i>Potentilla gracilis</i> var. <i>pulcherima</i>	Rosaceae	H herb	1	0.10	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Potentilla nivea</i>	Rosaceae	H herb	11	1.11	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Potentilla pensylvanica</i>	Rosaceae	H herb	3	0.13	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Castilleja nana</i>	Scrophulariaceae	H herb	29	0.11	Pfahlwurzel	Schuttstrecker
<i>Selaginella watsonii</i>	Selaginellaceae	H herb	42	6.90	dichtes Feinwurzelwerk	Schuttstauer

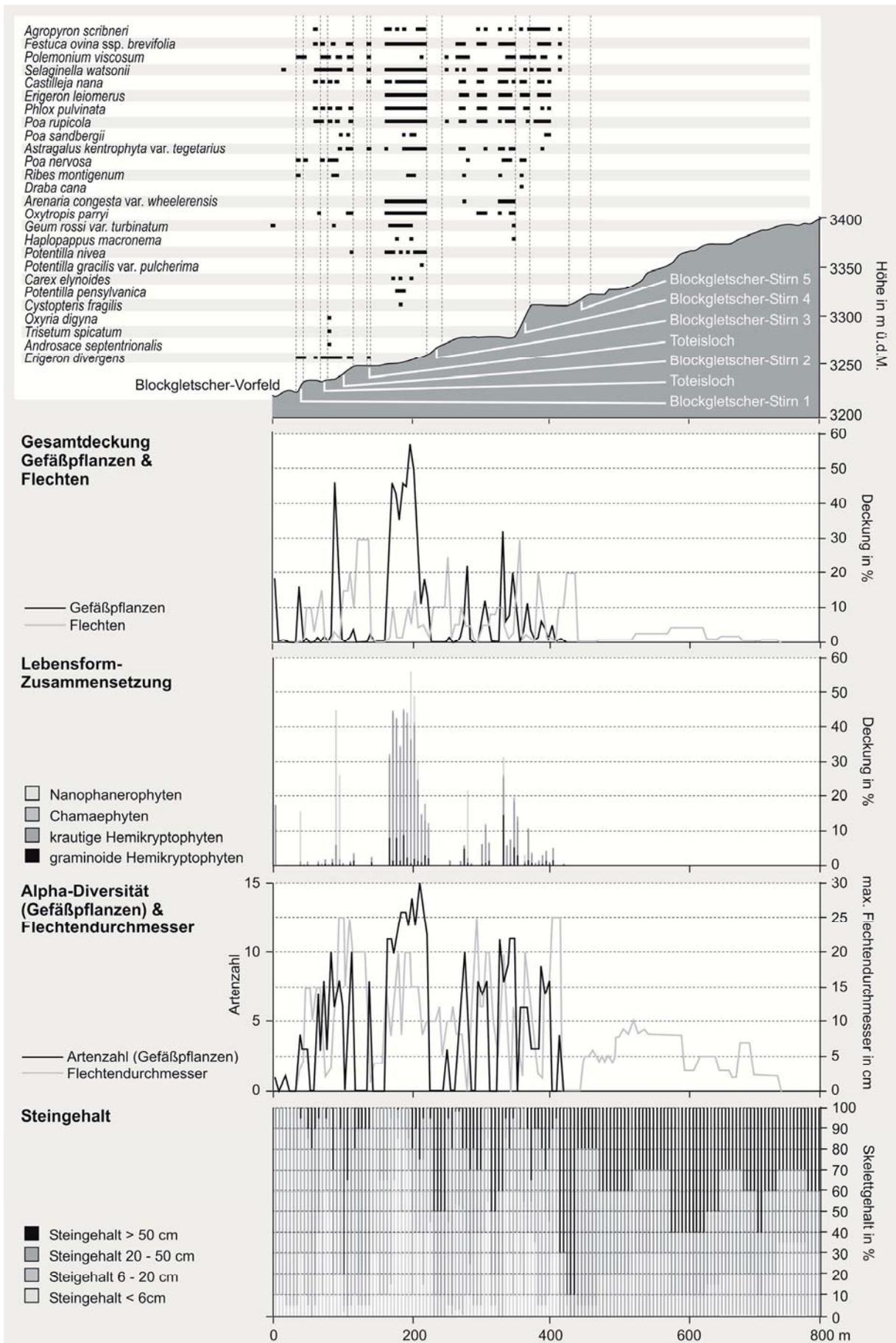


Abb. 3: Vegetationsprofil auf dem Lehman Blockgletscher mit Angaben zur Verbreitung der einzelnen Arten, zur Gesamtdeckung von Gefäßpflanzen und Flechten, zur Lebensformzusammensetzung, zur Alpha-Diversität der Gefäßpflanzen und zum Flechtendurchmesser sowie zur Blockigkeit der Standorte

Trotz ihrer im Vergleich zu echten Gletschern geringeren Bewegungsraten und mikroklimatisch weniger harschen Bedingungen scheinen Blockgletscher aber tatsächlich die ungünstigeren Pflanzenstandorte sein. Ein hoher Anteil grober Blöcke an der Oberfläche (Blockmantel), ausschmelzendes Eis im Untergrund und ungleichmäßige Bewegung führen zu einer stärkeren Substratmobilität an der Blockgletscheroberfläche, als es auf der Obermoräne vieler gleichmäßig dahin gleitender temperierter Gletscher der Fall ist. Vergleichbar niedrige Artenzahlen zur vorliegenden Studie sind jedenfalls von Blockgletschern aus dem Tien Shan (KOKAREV et al. 1997), aus den Alpen (SCHRÖDER et al. 1997, CANNONE & GERDOL 2003, RIEG et al. 2011) und den USA (Moores Creek Blockgletscher in der Toquima Range in Central Nevada, FICKERT unveröffentlichte Daten) belegt. Etwas höhere Werte (56 Arten) nennen GRAßMAIR & ERSCHBAMER (2015) für einen Blockgletscher im Tiroler Ötztal, wobei die Aufnahmeflächen hier subjektiv in stärker bewachsenen Arealen platziert wurden. Sehr hohe Artenzahlen (121 Arten) werden vom Murtel-Blockgletscher im schweizerischen Engadin berichtet (BURGA et al. 2004), wobei hier die relativ niedrige Höhenlage und die in weiten Teilen vorherrschende Inaktivität des Blockgletschers für die hohe Artenvielfalt verantwortlich ist.

Bei den auf dem Lehman-Blockgletscher vorgefundenen Pflanzenarten handelt es sich überwiegend um typische Vertreter der subnivalen Schuttfloren, die im Great Basin ohnehin relativ artenarm sind (vgl. FICKERT 2006, GRÜNINGER 2005) – auch das mag zur insgesamt geringen Alpha-Diversität beitragen. Süßgräser (*Poaceen*) sind mit sechs unterschiedlichen Taxa am artenreichsten vertreten, gefolgt von den *Rosaceen* und den *Asteraceen* mit jeweils drei Arten (vgl. Tab. 1). Der überwiegende Teil der Gattungen ist mit nur je einer Art vertreten. Während manche Arten nur in sehr wenigen oder gar nur in einem einzigen Transektsegment auftreten und eher zufällig auf dem Blockgletscher gelangt zu sein scheinen, gibt es andere Arten, die eine deutlich weitere Verbreitung besitzen und mit den Bedingungen auf der Blockgletscheroberfläche offenbar besser zurecht kommen. Die mittleren Deckungswerte bleiben aber auch bei ihnen in der Regel niedrig. Werte von mehr als 5 % erreichen lediglich *Ribes montigenum*, *Geum rossii* var. *turbinatum*, *Selaginella watsonii* und die Segge *Carex elynoides* (Tab. 1). Mit Ausnahme eines Phanerophyten (*Ribes montigenum*, vgl. Abb. 4) und zweier Chamaephyten (*Phlox pulvinata*, *Haplopappus macronema*, vgl. Abb. 4) handelt es sich bei den auf der Blockgletscher-Oberfläche angetroffenen Arten durchwegs um mehrjährige Kräuter und Gräser. Die Gefäßpflanzen konzentrieren sich dabei strikt auf die untere Hälfte des Blockgletschers (vgl. Abb. 3), der obere Teil ist frei von Gefäßpflanzen, hier wurden lediglich epilithische Flechten mit geringer Deckung und kleinen Durchmessern angetroffen.

In der von Gefäßpflanzen bestandenen unteren Hälfte des Blockgletschers zeigen sich deutliche Unterschiede im Artenbesatz. Dabei zeigt sich weniger ein höhenwärtiger Trend in der Artenverbreitung und den Deckungswerten der Gefäßpflanzen als vielmehr ein Mosaik unterschiedlicher Standorte in Abhängigkeit der Substratstabilität, der Verfügbarkeit besiedelbaren Feinmaterials und weiterer variabler Standortfaktoren (z. B. länger überdauernde bzw. perennierende Schneeflecken in Muldenlagen, mikroklimatische Gunst- bzw. Ungunstlagen, etc.). So zeichnen sich sowohl die steileren Stirnbereiche als auch die Toteislöcher durch geringen oder gänzlich fehlenden Pflanzenwuchs aus (vgl. Stirn 3 und 5), während die dazwischen liegenden Bereiche z.T. recht hohe Artenzahlen (bis zu 15 Arten pro 10 m²) und Deckungswerte (> 50 %) erreichen (Abb. 3). Wie Abbildung 3 zeigt, fallen dabei hohe Artenzahlen der Gefäßpflanzen häufig mit Standorten zusammen, die einen erhöhten Anteil an Feinmaterial (Steingehalt < 6 cm) besitzen und stabilere Oberflächen (= größeren Flechtendurchmesser) aufweisen. Statistisch sind diese Zusammenhänge aber nicht signifikant, wie die geringen Bestimmtheitsmaße von Korrelationen zwischen Artenzahlen und Gesamtdeckungswerten der Gefäßpflanzen pro Transektsegment mit dem Gehalt an Feinmaterial (Steingehalt < 6 cm) und der Substratstabilität (angezeigt durch Flechtendurchmesser und Flechten-

deckung) belegen (vgl. Abb. 5). Ähnliches ist aus Untersuchungen zur Primärsukzession jüngst eisfrei gewordener Gletschervorfelder der Alpen belegt (vgl. FICKERT 2016). Abgesehen von Standorten, die zu fast 100 % aus groben Blöcken bestehen und somit Pflanzen kaum Ansiedlungsmöglichkeiten bieten, können auf der Blockgletscheroberfläche selbst sehr blockige Standorte z. T. sehr vielfältig von Pflanzen besiedelt werden, sofern ein Minimum an durchwurzelbaren Feinsubstrats vorhanden und eine ausreichende Feuchte- und Nährstoffversorgung gewährleistet ist. Wie in Gletschervorfeldern stellt ein hoher Anteil an grobem Verwitterungsschutt weniger ein Hindernis für die Etablierung von Pflanzen dar, vielmehr werden durch die größeren Blöcke häufig "safe sites" im Sinne von HARPER et al. (1965) oder JUMPPONEN et al. (1999) geschaffen, die den Pflanzen geschützte, mikroklimatisch begünstigte Standorte bieten. Entsprechend lassen sich keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Anteil an Grobmaterial und Artenzahlen und Deckungswerten feststellen (Abb. 5).



Abb. 4: Pflanzen des Lehman-Blockgletschers (im Uhrzeigersinn von links oben): *Astragalus kentrophyta* var. *tegetarius*, *Ribes montigenum*, *Haplopappus macronema*, *Polemonium viscosum*.

Eine noch weitere Streuung zeigen die Korrelationen zwischen der über die Flechtendurchmesser und -deckung angezeigten Substratstabilität und den Artenzahlen bzw. den Deckungswerten der

Gefäßpflanzen (Abb. 5). Selbst stabile Standorte können von wenig Pflanzen besiedelt sein, wenn es sich um extrem grobblockiges Material handelt, was auf aktiven Blockgletschern durch die Ausbildung eines Blockmatels häufig der Fall ist. Andererseits sind subnival verbreitete Pflanzen zumeist in der Lage mit angepassten Wurzelsystemen (u. a. tiefreichende Pfahlwurzeln, wandernde Kriechtriebe, dichter Wurzelfilz, vgl. Abb. 6 und Tab. 1) auch ein gewisses Maß an Substratmobilität zu ertragen. Nach der von REISIGL & KELLER (1994) vorgelegten Typisierung von Schuttpflanzen überwiegen auf dem Lehman Blockgletscher die Schuttstreckere (14 Arten), die sich mit kräftigen Pfahlwurzeln in größerer Tiefe verankern und nicht zu starken Substratbewegungen durch Triebverlängerung standhalten. Mit neun Arten sind auch Schuttstauer häufig vertreten, zu denen insbesondere Graminoide zählen, die mit einem dichten Feinwurzelwerk und kräftigen Triebbündeln Substratbewegungen bremsen. Schuttwanderer, die mit sich wieder bewurzelnden Kriechtrieben (Rhizome, Ausläufer) den Schutt durchsetzen, sind mit drei Arten nur gering vertreten.

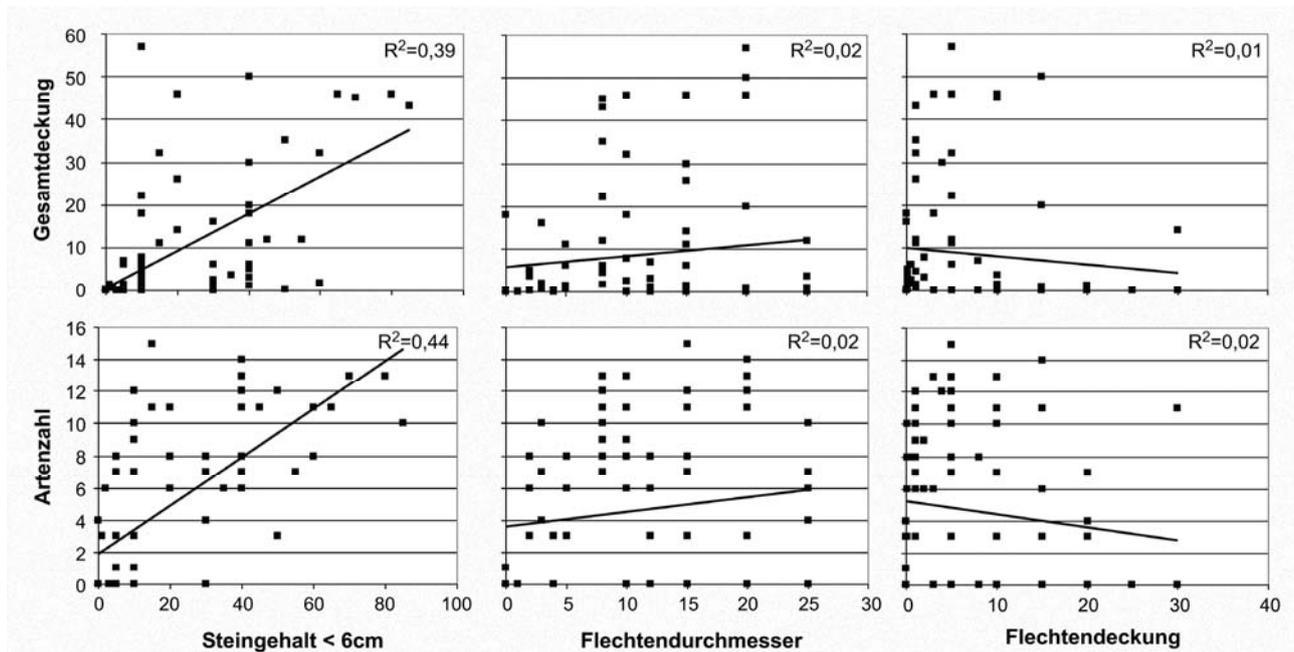


Abb. 5: Korrelationen von Gesamtdeckung und Artenzahlen der Gefäßpflanzen pro Transektsegment mit dem Gehalt an Feinmaterial (Steingehalt < 6 cm) und der Substratstabilität (angezeigt durch Flechtendurchmesser und Flechtendeckung).

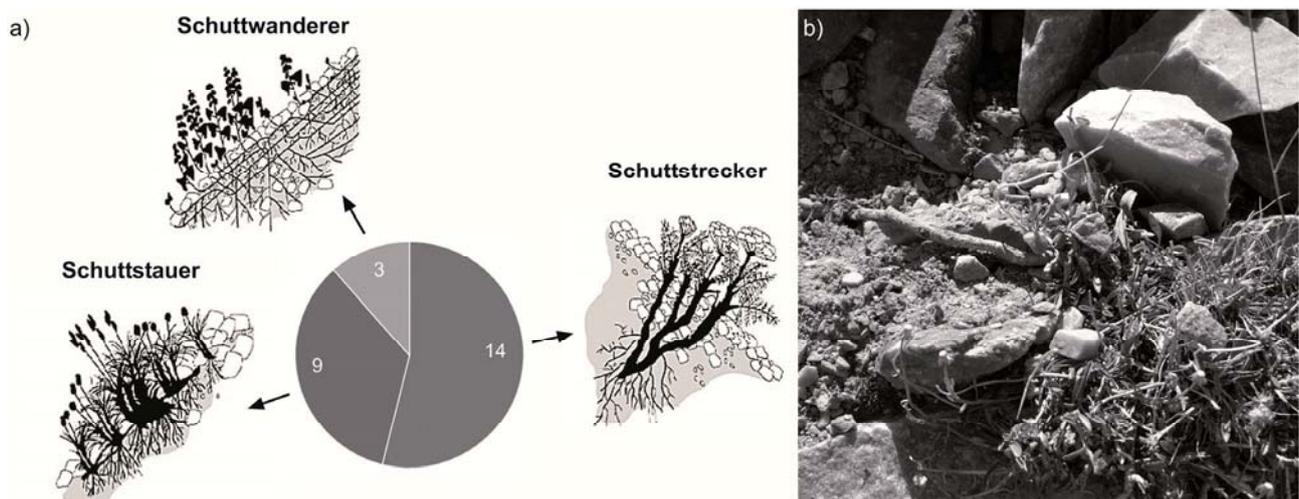


Abb. 6: a) Anteile der auf dem Lehman Blockgletscher wachsenden Pflanzen an den unterschiedlichen Schuttpflanzentypen „Schuttstreckere“, „Schuttstauer“ und „Schuttwanderer“ (nach REISIGL & KELLER 1994); b) durch Substratmobilität freigelegte Pfahlwurzel von *Erigeron leiomerus*.

Deutliche Einbrüche sowohl bei den Artenzahlen als auch bei den Deckungswerten zeigen sich in Bereichen starker Substratinstabilität, insbesondere an den steileren Stirnbereichen und innerhalb der ausgetauten Toteislöcher (vgl. Abb. 3). Hier kommt es zu einer Auslese nicht angepasster Taxa. Der überwiegende Teil der auf dem Lehman Blockgletscher auftretenden Pflanzen stammt aus dem subnivalen Umfeld, in dem frostdynamische Bodenbewegungen weitverbreitet sind und somit eine gewisse Toleranz der vorkommenden Arten gegenüber instabiler Bodenoberflächen vorliegt. Etliche nahe verwandte Taxa zu den auf der Blockgletscheroberfläche wachsenden Arten (u. a. *Astragalus kentrophyta* var. *tegetarius*, *Polemonium viscosum*, siehe Abb. 4) haben sich in anderem Kontext jedenfalls als relativ robust gegenüber mechanischer Belastung infolge erhöhter Substratmobilität erwiesen (vgl. FICKERT & GRÜNINGER 2002 zu Interaktionen zwischen Vegetation und frostbedingter Morphodynamik in verschiedenen Gebirgen des Great Basin).

5 Die Vegetationsdifferenzierung auf dem Lehman Blockgletscher als Indikator der Blockgletscherdynamik

Die Hauptkomponentenanalyse in Abbildung 7 fasst die Verbreitungsmuster der Vegetation auf der Oberfläche des Blockgletschers zusammen und ermöglicht eine Einschätzung der internen Variabilität der Blockgletscherdynamik. Die größte Varianz im Datensatz wird durch die Unterschiede in den Artenzahlen und den Gesamtdeckungen der Segmente aufgespannt, diese Merkmale korrelieren hoch (0,9 bzw. 0,77) mit der 1. Hauptkomponente. Transektsegmente mit hohen Deckungswerten und Artenzahlen der Gefäßpflanzen finden sich in den beiden rechten Quadranten der Ordination. Es handelt sich bei diesen Aufnahmen überwiegend um schwächer geneigte Blockgletscher-Oberflächen, die relativ stabil sind (angezeigt über überdurchschnittlich große Flechtendurchmesser) und einen höheren Gehalt an Feinmaterial (< 6 cm) aufweisen. In den linken beiden Quadranten überwiegen dagegen arten- und deckungsarme Aufnahmen, von denen viele den von wenig konsolidiertem Grobmaterial gekennzeichneten Stirnbereichen und den Toteislöchern angehören. Die größere Steilheit einiger Stirnbereich-Segmente drückt sich in ihre Position im oberen Bereich des Ordinationsraumes aus, die Hangneigung korreliert positiv (0,33) mit der 2. Hauptkomponente. Anhand der Vegetationsausprägung auf der Blockgletscheroberfläche des Lehman Blockgletschers lassen sich Bereiche unterschiedlicher Blockgletscherdynamik ausmachen. Das völlige Fehlen von Gefäßpflanzen, die geringe Flechtendeckung und die im Vergleich zum unteren Teil deutlich geringeren Flechtendurchmesser können als Indikator dafür gewertet werden, dass der obere Teil tatsächlich rezenter Aktivität und durchgängigem Eisgehalt unterliegt. Erst unterhalb von Stirn 5 treten die ersten Gefäßpflanzen auf, bei gleichzeitig zunehmender Flechtendeckung und größeren Flechtendurchmessern, was auf eine gewisse Konsolidierung des Blockgletschers hinweist. Im weiteren Verlauf bis zur Blockgletscherzunge zeigen sich aber immer wieder markante Einbrüche in den Artenzahlen und den Deckungswerten, die mit grobblockigeren und/oder mobileren Bereichen zusammenfallen. Dieses Muster spricht für die von VAN HOESEN & ORNDORFF (2011) geäußerte Vermutung einzelner Eis-Linsen, die hier im unteren Teil zu einer räumlich variablen Blockgletscher-Dynamik führen.

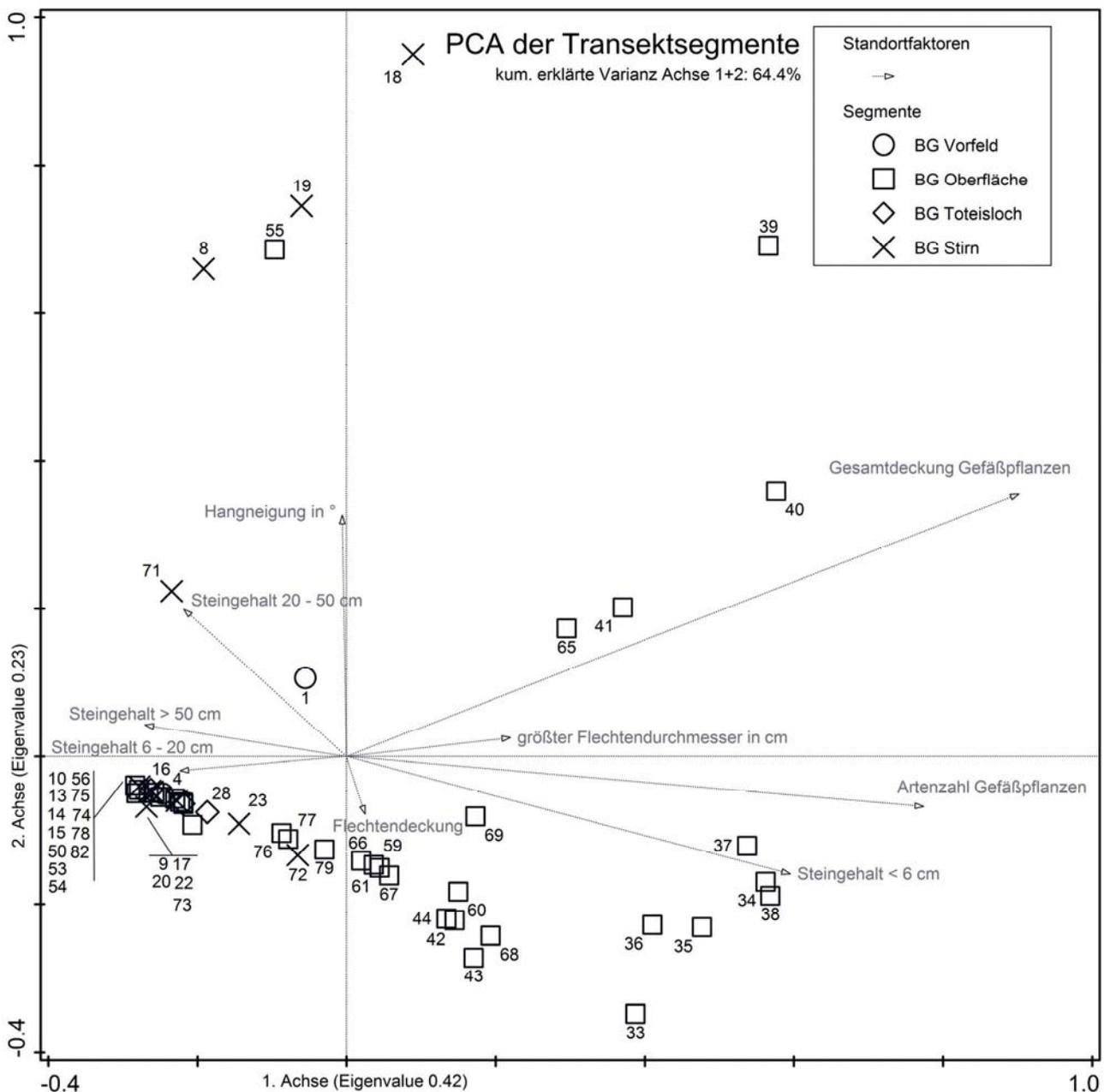


Abb. 7: Principal Component Analysis (PCA) aller Transektsegmente die Gefäßpflanzen beherbergen (mit Zahlen, Beginn des Transektes unten im Blockgletscher-Vorfeld); die einzelnen Segmente wurden den vier Klassen *Blockgletscher-Vorfeld*, *Blockgletscher-Stirne*, *Toteislöcher* und *Blockgletscher-Oberfläche* zugewiesen; Standortvariablen überlagern als Pfeile die Ordination. Die auf den ersten beiden Achsen erklärte kumulative Varianz beträgt 64,4 %.

6 Literatur

- BARSCH, D. (1988): Rock glaciers. In: CLARK, M.J. (Hrsg.): Advances in periglacial geomorphology. Chichester et al., Seite 69-90.
- BESCHEL, R. (1957): Lichenometrie im Gletschervorfeld. In: *Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und -tiere*, Jg. 22, Seite 164-185.
- BURGA, C.A.; FRAUENFELDER, R.; RUFFET, J.; HOELZLE, M. & KÄÄB, A. (2004): Vegetation on Alpine rock glacier surfaces: a contribution to abundance and dynamics on extreme plant habitats. In: *Flora*, 199, Seite 505-515.
- CACCIANIGA, M.; ANDREIS, C.; GUGLIELMINA, D.; D'AGATA, C.; MIHALCEA, C. & SMIRAGLIA, C. (2011): Alpine debris-covered glacier as a habitat for plant life. In: *The Holocen*, 21/6, Seite 1011-1020.

- CANNONE, N. & GERDOL, R. (2003): Vegetation as an Ecological Indicator of Surface Instability in Rock Glaciers. In: *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35/3, Seite 384-390.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, A.H.; HOLMGREN, N.H. & REVEAL, J.L. (1986): Intermountain Flora Vol. 1. New York.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, A.H.; HOLMGREN, N.H.; REVEAL, J.L. & HOLMGREN, P.K. (1995): Intermountain Flora Vol. 5: Asterales. New York.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, A.H.; HOLMGREN, N.H.; REVEAL, J.L. & HOLMGREN, P.K. (1996): Intermountain Flora Vol. 4: Asteridae (except Asteraceae). New York.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, N.H. & HOLMGREN, P.K. (1997a): Intermountain Flora Vol. 3A: Rosidae (except Fabales). New York.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, A.H.; HOLMGREN, N.H.; REVEAL, J.L. & HOLMGREN, P.K. (1997b): Intermountain Flora Vol. 3B: Fabales. New York.
- CRONQUIST, A.; HOLMGREN, A.H.; HOLMGREN, N.H.; REVEAL, J.L. & HOLMGREN, P.K. (1998): Intermountain Flora Vol. 6: Monocotyledones. New York.
- FICKERT, T. (2006): Phytogeographische Studien als Mittel zur Klimaableitung in Hochgebirgen. In: *Passauer Schriften zur Geographie*, Bd. 22, 172 Seiten.
- FICKERT, T. (2016): Zur Bedeutung von Dauerbeobachtungsstudien in der Sukzessionsforschung – Zwei Fallstudien zur Primärsukzession in Gletschervorfeldern in den Ostalpen und zur Sekundärsukzession sturmgestörter Mangrovenwälder in Honduras. In: *Passauer Schriften zur Geographie*, Bd. 29, 158 Seiten.
- FICKERT, T. & GRÜNINGER, F. (2002): Interaktionen von Vegetation und frostbedingter Morphodynamik in Gebirgen des semiariden Great Basin. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 146, Seite 16-25.
- FICKERT, T.; FRIEND, D.; GRÜNINGER, F.; MOLNIA, B. & RICHTER, M. (2007): Did Debris-Covered Glaciers Serve as Pleistocene Refugia for Plants? A New Hypothesis Derived from Observations of Recent Plant Growth on Glacier Surfaces. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39 (2), Seite 245-257.
- GIARDINO, J.R.; SHRODER, J.F. & LAWSON, M.P. (1984): Treering analysis of movement of a rock-glacier complex on Mount Mestas, Colorado USA. In: *Arctic and Alpine Research*, 16, Seite 299-309.
- GOBBI, M.; BALLARIN, F.; COMPOSTELLA, C.; LENCIONI, V.; SEPPI, R.; TAMPUCCI, D. & CACCIANIGA, M. (2014): Physical and biological features of an active rock glacier of the Italian Alps. In: *The Holocene*, 24, Seite 1624-1631.
- GRAßMAIR, R. & ERSCHBAMER, B. (2015): Die Besiedlung des Blockgletschers Äußeres Hochebenkar im Vergleich zur angrenzenden Vegetation. In: SCHALLHART, N. & ERSCHBAMER, B. (Hrsg.): *Forschung am Blockgletscher – Methoden und Ergebnisse*, Alpine Forschungsstelle Obergurgl, Bd. 4, Seite 159-180.
- GRÜNINGER, F. (2005): Scale dependent aspects of plant diversity in semiarid high mountain regions. An exemplary top-down approach for the Great Basin (USA). In: *Passauer Schriften zur Geographie*, Bd. 21, 143 Seiten.
- GRÜNINGER, F. (2015): Der ökologische Preis des „Winning of the West“ – Auswirkungen der Kolonisation auf die Ökosysteme peripherer Gebirgsregionen im semiariden Westen der USA. In: *Geographische Rundschau*, 7/8, Seite 24-31.
- GRÜNINGER, F. & FICKERT, T. (2008): Diversity is in the eye of the beholder – Plant diversity patterns and their Relation to Scale: Examples from the south-western USA. In: LÖFFLER, J. & STADELBAUER, J. (Hrsg.): *Diversity in Mountain Systems*, Colloquium Geographicum 31, Seite 33-56.

- HAEBERLI, W. (1985): Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of Alpine Rock Glaciers. ETH, Zürich, 42 Seiten.
- HARPER J.L.; WILLIAMS J.T. & SAGER, G.R. (1965): The behavior of seeds in soil (I): The heterogeneity of soil surfaces and its role in determining the establishment of plants from seed. In: *Journal of Ecology*, 53, Seite 273-286.
- HÖLLERMANN, P. (1983): Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe. In: *Bonner Geographische Abhandlungen*, 67, Seite 1-73.
- HOLMGREN, N.H.; HOLMGREN, P. & CRONQUIST, A. (2005): Intermountain Flora Vol. 2B: Dilleniidae. New York.
- HOLMGREN, N.H.; HOLMGREN, P. & REVEAL, J.L. (2012): Intermountain Flora Vol. 2A: Magnoliidae-Caryophyllidae. New York.
- JANKE, J.R. (2007): Colorado Front Range rock glaciers: distribution and topographic characteristics. In: *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, Seite 74-83.
- JUMPPONEN, A.; VARE H.; MATTSON K.G.; OHTONEN R. & TRAPPE, J.M. (1999): Characterization of 'safe sites' for pioneers in primary succession on recently deglaciated terrain. In: *Journal of Ecology*, 87/1, Seite 98-105.
- KLAER, W. (1974): Kritische Anmerkungen zur neueren Literatur über das Blockgletscherproblem. In: *Heidelberger Geographische Arbeiten*, 40, Seite 275-291.
- KOKAREV, A.; SCHESTEROVA, I. & SCHRÖDER, H. (1997): Die Blockgletscher im Sailijski Alatau des Tienschan (Kasachstan). In: *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, Bd. 19, Reihe A, Seite 81-94.
- MILLAR, C.I. & WESTFALL, R.D. (2008): Rock glaciers and related periglacial landforms in the Sierra Nevada, CA, USA; inventory, distribution and climatic relationships. In: *Quaternary International*, 188, Seite 90-104.
- MUELLER-DOMBOIS, D. & ELLENBERG, H. (1974): Aims and methods of vegetation ecology, Wiley & Sons, New York, 547 Seiten.
- ORNDORFF, R.L.; WIEDER, R.W. & FILKORN, H.F. (2001): Geology underfoot in Central Nevada, Mountain Press Missoula, 294 Seiten.
- OSBORN, G. & BEVIS, K. (2001): Glaciation in the Great Basin of the Western United States. In: *Quaternary Science Reviews*, 20, Seite 1377-1410.
- RIEG, L.; SAILER, R. & STÖTTER, J. (2011): Vegetation on Alpine rockglaciers. In: BORS DORF, A.; STÖTTER, J. & VEULLIET, E. (Hrsg.): Managing Alpine Future II – Inspire and drive sustainable mountain regions. IGF-Forschungsberichte 4, Wien, Seite 222-232.
- RAUNKIAER, C. (1934): The life-forms of plants and statistical plant geography. Oxford University Press, 632 Seiten.
- REISIGL, H. & KELLER, R. (1994): Alpenpflanzen im Lebensraum. G. Fischer-Verlag, Stuttgart.
- RICHTER, M.; FICKERT, T. & GRÜNINGER, F. (2004): Pflanzen auf schuttbedeckten Gletschern - Wandernde Kuriositäten. In: *Geoöko*, 25, Seite 225-256.
- SCHRÖDER, H. (1992): Aktive Blockgletscher im zentralen Teil des nördlichen Tienschan. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 136, Gotha, Seite 109-119.
- SCHRÖDER, H.; SCHESTEROVA, I. & KOKAREV, A. (1997): Blockgletschermorphogenese im oberen Frosnitz-Tal (Osttirol). In: *Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft*, Bd. 44, Seite 173-190.
- SCHRÖDER, H.; KOKAREV, A. & HARRISON, S. (2005): Rock glaciers in the northern Tien Shan, Kazakhstan: new data on movement rates and distribution. In: *Glacial Geology and Geomorphology*, rp01/2005.
- TER BRAAK, C.J.F. & ŠMILAUER, P. (2012): CANOCO reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.0). Ithaca.

- TAMPUCCI, D.; GOBBI, M.; MARANO, G.; BORACCHI, P.; BOFFA, G.; BALLARIN, F.; PANTINI, P.; SEPPI, R.; COMPOSTELLA, C. & CACCIANIGA, M. (2017): Ecology of active rock glaciers and surrounding landforms: climate, soil, plants and arthropods. In: *Boreas*, DOI: 10.1111/bor.12219.
- USGS (o.J.): <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- VAN HOESEN, J.G. & ORNDORFF, R.L. (2011): The Morphology and Spatial Distribution of Late Quaternary Periglacial Landforms, Snake Range, Nevada: A Gis-Based Approach to Prioritizing Field Sites. In: *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*, 43(1), Seite 48-60.
- WASHBURN, A.L. (1973): Periglacial processes and environments, London, 320 Seiten.
- WEISCHET, W. (1996): Regionale Klimatologie – Teil 1: Die Neue Welt. Stuttgart.
- WHITE, S.E. (1971): Rock glacier studies in the Colorado front range, 1961–1968. In: *Arctic and Alpine Research*, 3, Seite 43-65.
- WHITE, S.E. (1976): Rock glaciers and rock fields, review and new data. In: *Quaternary Research*, 6, Seite 77-97.