© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Kapitel 5 | Die Böden eines alpinen Gletschertales

Erich Schwienbacher, Eva-Maria Koch

Zusammenfassung

Die Bodenentwicklung ist eines der deutlichsten Merkmale der Primärsukzession. In erster Linie ist sie eine Funktion der Zeit, wobei zahlreiche Faktoren und Prozesse die Richtung und Geschwindigkeit der Genese bestimmen: das Ausgangsmaterial, welches Gefüge, Mineralbestand und Körnung des Bodens beeinflusst, das Klima, wobei hier vor allem Temperatur und Niederschlag zu den wichtigsten Parametern der Bodengenese zählen, und die Verwitterung, vor allem jene durch physikalische Prozesse. Auch Vegetation, Bodenfauna und Bodenmikroorganismen zählen zu den Boden prägenden Faktoren. Heterogene Verhältnisse im Bezug auf Substrat, Relief, Wassereinfluss, Mikroklima, Oberflächenstruktur sowie Erosionserscheinungen führen zu einem Verwischen des Zeitgradienten. Ausgangspunkt der Sukzession im Gletschervorfeld des Rotmoostales sind Rohböden, die sich zu Pararendzinen weiterentwickeln. Im Einflussbereich von Bächen entstehen Schwemmböden, außerhalb des Gletschervorfeldes finden sich Braunerde- und Podsolböden. Die Bodenreaktion im Gletschervorfeld ist aufgrund unterschiedlicher Ausgangsgesteine heterogen, jedoch lässt sich mit zunehmendem Alter eine Versauerung beobachten. Bezüglich der Bodenelemente ist vor allem die Zunahme der organischen Substanz als deutlichstes Merkmal der Bodenentwicklung zu erkennen.

Abstract

For primary succession, soil development is one of the most significant characteristics. Predominantly it is a function of time, whereas the direction and speed of soil genesis is affected by numerous different factors and processes: parent rock material, which causes structure, mineralogical composition and grain size of soil, climate, especially temperature and precipitation, and weathering, mainly because of physical processes. Also vegetation, soil fauna and microorganisms are soil formative factors. Heterogeneous circumstances in substrate, relief, water influence, microclimate, surface structure and erosion obscure the time gradient partly. The succession in the glacier foreland of the Rotmoosvalley starts with virgin soils (Regosol), which develop further into ‚Pararendzina' (Rendzic Leptosol). In the near of streams alluvial soils (Fluvisol) are formed, whereas outside the glacier foreland ‚Braunerde' (Cambisol) and ‚Podsol' (Podzol) dominate. Different rock material within the foreland causes a high variation of soil reaction, though generally soil is getting more acid with increa-

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

sing age. Concerning soil elements the increase of organic matter is most relevant.

Forschungsgeschichte

Die „Dicke der Erdkrume in den Alpen“ beschäftigte bereits die Pioniere der Alpenerforschung wie die Brüder Schlagintweit, die in ihrem umfassenden Werk über die Alpen auch von ihren Forschungsaufenthalten im Hinteren Ötztal berichten (Schlagintweit und Schlagintweit 1850). Sie liefern bereits detaillierte Angaben zu Verwitterungsprozessen und dem Humusgehalt der Böden. Die ersten umfangreichen Untersuchungen der Böden im Raum Obergurgl wurden Mitte des 20. Jahrhunderts in der subalpinen Stufe von Poschach (1.850m bis 2.300m) durchgeführt. Neuwinger und Czell (1959) beschrieben dabei 18 unterschiedliche Bodenformen sowie mehrere Entstehungsreihen in Wechselbeziehung mit dem Relief und der vorhandenen Vegetation. Im Rahmen des UNESCO-Programms „Man and Biosphere“ (MaB) folgte dann eine detaillierte Kartierung der alpinen Böden im Bereich der Hohen Mut (Neuwinger 1987), welche von Starnberger (2006) durch weitere Bodenuntersuchungen im Gebiet des Biosphärenreservats „Gurgler Kamm“ ergänzt wurde.

Die Böden der alpinen Stufe standen im Alpenraum jedoch schon länger im Interesse der Forschung (z.B. Braun-Blanquet und Jenny 1926). Vor allem die Bodenentwicklung im Laufe der Primärsukzession der Gletschervorfelder war eine zentrale Fragestellung zahlreicher Studien in den Alpen (Friedel 1934, Friedel 1938a, 1938b, Lüdi 1945), aber auch in anderen vergletscherten Gebieten der Erde (Crocker und Major 1955, Crocker und Dickson 1957). Der Tradition dieser Pionierarbeiten folgend, untersuchte auch Jochimsen (1962) erstmals die Bodenverhältnisse in den Gletschervorfeldern des Rotmoos- und des Gaisbergferners, die sie in Relation zu den Vegetationsverhältnissen beschrieb. Obwohl in Folge auch die Böden im Gaisbergtal noch öfters untersucht wurden (Duelli 1987, Wiedemann 1991), stand in den letzen 20 Jahren vor allem das Rotmoostal im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Forschung.

Erschbamer et al. (1999) untersuchten erstmals gezielt die Bodenentwicklung entlang der Chronosequenz im Gletschervorfeld des Rotmoosferners im Vergleich zur Vegetationsentwicklung, während Kaufmann et al. (2002) die Bodenentwicklung mit der Sukzession der Bodenfauna verglich. Schwienbacher (2004) lieferte eine umfangreiche Darstellung der potentiellen Bodenreaktion vom Gletschervorfeld des Rotmoosferners und bestätigte damit die Unterschiede in den Bodenverhältnissen und dem Sukzessionsverlauf zwischen den beiden

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Talseiten, welche bereits früher schon von anderen Autoren angeführt wurden (Jochimsen 1962, 1970, Rudolph 1991, Raffl 1999, Mallaun 2001, Kaufmann 2001). Neben den Änderungen der bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften entlang der Chronosequenz war auch die mikrobielle Bodenaktivität ein zentrales Thema wissenschaftlicher Studien. Nachdem bereits Insam und Haselwandter (1989) erstmals die Bodenatmung von Böden unterschiedlichen Alters im Rotmoostal analysierten, folgten rund 15 Jahre später weitere Studien zur Aktivität und Diversität der mikrobiellen Gemeinschaften (Tscherko et al. 2003, 2004, 2005, Nicol et al. 2005, 2006, Kandeler et al. 2006, Deiglmayr et al. 2006). Es wurden aber nicht nur die bakteriellen Mikroorganismen untersucht, auch die Pilzgemeinschaften der Böden wurden analysiert. Zahlreiche Studien lieferten einen detaillierten Einblick in die Diversität und die Bedeutung der Mykorrhizapilze in den Böden des Rotmoostales (vgl. Kap. 9).

Das Rotmoostal, und hier vor allem das Gletschervorfeld des Rotmoosferners, zählen wohl auch hinsichtlich der Bodenverhältnisse zu den am besten untersuchten Primärsukzessionen weltweit. Dieses fundierte Wissen bildet auch die Basis für zahlreiche neue Fragestellungen zur Bodengenese und zur Rolle des Bodens, welche auch in Zukunft für die wissenschaftliche Erforschung dieses Ökosystems spannende Herausforderungen darstellen. Ein Reihe aktueller internationaler Studien zu verschiedenen Aspekten des Ökosystems Boden in der Primärsukzession von Gletschervorfeldern belegen die Aktualität dieses Forschungsbereichs (z.B. Egli et al. 2006a, 2006b, Haugland und Haugland 2008, Dolezal et al. 2008, He und Tang 2008, Strauss et al. 2009, Mahaney et al. 2009, Lazzaro et al. 2009).

Die Bodenentwicklung entlang der Chronosequenz

In der Sukzessionsforschung wird häufig mit der Chronosequenz als Skala für die Entwicklung gearbeitet, d.h. man untersucht an Stelle einer zeitlichen Entwicklung eines Stadiums einer bestimmten Lokalität, eine räumliche Abfolge von Stadien unterschiedlichen Alters. In der Literatur wird diese Methode auch mit den Begriffen „space for time-substitution“ oder „location for time-substitution“ bezeichnet (Matthews 1992). Dieser Ansatz hat nur unter bestimmten Bedingungen Gültigkeit, und daher finden sich in der Literatur auch eine Reihe von kritischen Anmerkungen zu diesem Forschungsansatz (siehe Review in Johnson und Miyanishiate 2008). Trotzdem hat sich diese Herangehensweise vor allem aus praktischen Gründen bewährt und wurde in der Erforschung von Primärsukzessionen weltweit erfolgreich angewandt:

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

z.B. in Sanddünen (Lichter 1998), auf Vulkanen (Aplet et al. 1998) und in Gletschervorfeldern (Matthews 1992). Auch bei der Untersuchung der Bodengenese in Gletschervorfeldern wurde dieser Ansatz bereits in der klassischen Arbeit von Crocker und Major (1955) benutzt, in Folge vielfach aufgegriffen (siehe Review in Stevens und Walker 1970) und findet bis heute weltweit Anwendung z.B. in aktuellen Studien in China (He und Tang 2008), in Japan (Dolezal et al. 2008), in Venezuela (Mahaney et al. 2009) und auch in der Antarktis (Strauss et al. 2009). Diese Vorgehensweise ist vor allem dann aussagekräftig, wenn eine räumlich möglichst klar getrennte Abfolge von Moränen bekannten Alters vorliegt, wie dies im Rotmoostal der Fall ist (vgl. Kap. 7). Man sollte sich jedoch bewusst sein, dass die Bodenentwicklung zwar in erster Linie eine Funktion der Zeit ist (Mückenhausen 1993), jedoch zahlreiche weitere Faktoren die Bodenentwicklung prägen und verschiedenste Prozesse auch im Modellgebiet Rotmoostal zum „Verwischen" des Zeitgradienten führen können (Mallaun 2001).

Prägende Faktoren und Prozesse der Bodengenese

Ausgangsmaterial

Das Ausgangsmaterial beeinflusst Gefüge, Mineralbestand und Körnung des Bodens und somit Richtung und Geschwindigkeit der Entwicklung (Scheffer und Schachtschabel 1998). Der Gletscher transportiert durch die Fließbewegung unterschiedliches Schuttmaterial. Dieses wird an der Gletscherstirn, am Rand und im Zehrgebiet vorwiegend unsortiert ab- und eventuell durch Schmelzwasser wieder umgelagert (vgl. Kap. 2). Dieses Material ist meist skelettreich, jedoch kann die Korngrößenverteilung bereits am Beginn der Bodengenese beträchtlich variieren. So unterscheiden sich die Anteile des Feinbodens verschiedener Pionierstandorte im Rotmoostal signifikant voneinander (Abb. 1.B). Auf Grund der heterogenen geologischen Verhältnisse, wie sie im hinteren Rotmoostal, aber auch im Gaisbergtal vorherrschen, ist dieses Material aus unterschiedlichen Gesteinen zusammengesetzt (vgl. Kap. 2). Es überwiegen sauer verwitternde Paragneise und mineralreiche Glimmerschiefer, jedoch ist das Material der Moränen im Rotmoostal durch den Einfluss der Gesteine des Schneeberg Komplexes im südlichen Talbereich karbonatreich.

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

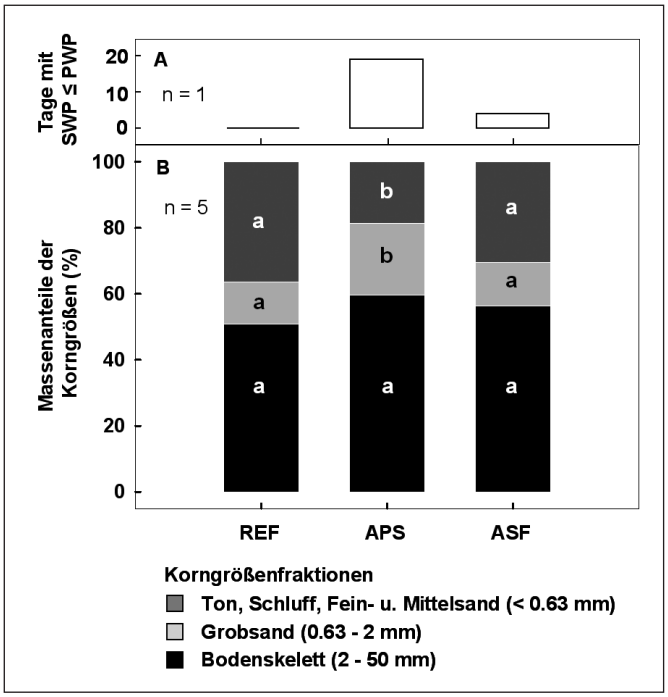

Abb. 1:
(A) Anzahl der Tage, an denen das Bodenwasserpotential (SWP) den permanenten Welkepunkt (PWP) von -1,5 MPa in einer Bodentiefe von 3 cm während der Vegetationsperiode 2008 an unterschiedlichen Pionierstandorten erreichte. (B) Korngrößenanteile des Feinbodens und Anteil des Bodenskeletts von Rohböden der Pionierstandorte (Probentiefe 10 cm). REF – Rezent eisfreie Fläche (2003er Moräne); APS – Alter Pionierstandort (1971er Moräne); ASF – Alluviale Schwemmfläche des Bachbetts (zuletzt vor ca. 15 Jahren überschottert). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Korngrößenfraktion.

Klima und Relief

Temperatur und Niederschlag zählen zu den wichtigsten Parametern der Bodengenese. Eine Charakterisierung dieser beiden klimatischen Faktoren für den Raum Obergurgl liefert Kapitel 3. Im Gebirgsraum werden diese beiden Faktoren durch das Relief zum Teil erheblich modifiziert. Neuwinger (1987) bezeichnete das Relief sogar als den maßgeblich prägenden Faktor bei der Ausbildung der Böden im Raum Obergurgl. Die Wirkung des Reliefs besteht vor allem darin, dass es alle weiteren Boden bildenden Faktoren durch die Höhenlage, die Exposition und die Geländeform modifiziert (Scheffer und Schachtschabel 1998). Dies gilt sowohl für die Schwerkraft, als auch für die Wasserführung und die klimatischen Einflüsse. So ist im Rotmoostal, neben der eigentlichen Wirkung der Exposition, die Besonnungsdauer auf den Nord- bis Nordost exponierten Hängen der orographisch linken Talseite (Abb. 2, Abb. 3) gegenüber den durchwegs Süd- bis Südwest gerichteten Seitenhängen der rechten Talseite entlang des Hohen Mut Rückens (Abb. 4, Abb. 5) deutlich reduziert. Dies ist eine Folge der Horizontüberhöhung durch die Gipfel des südlichen Talschlusses (Kaufmann 2001, Raffl et al. 2006). Die Gipfel am Zentralkamm befinden

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Abb. 2:
Innerer Talbereich des Rotmoostales – orographisch linke Seite des Rotmoos-Gletschervorfeldes mit zahlreichen Schuttkegeln am Hangfuß und mit episodisch überrieselten, von Rinnen durchzogenen Schwemmfächern im Talboden. Im unteren, rechten Bildbereich der Moränenwall der markanten Endmoräne aus dem Jahr 1858. (Foto: E. Schwienbacher)

Abb. 3:
Äußerer Talbereich des Rotmoostales mit dem nordostexponierten Unterhang des Hangerers auf der orographisch linken Seite (linke obere Bildhälfte) und den ausgeprägten Bachalluvionen der Rotmoosache, die auf der rechten Talseite bis zum Rotmoosmoor reichen (Bildmitte). Am Talausgang unterhalb der Senke das Schönwiesmoor, das nach Norden in den Schönwieskopf übergeht (obere rechte Bildhälfte).
(Foto: E. Schwienbacher)

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

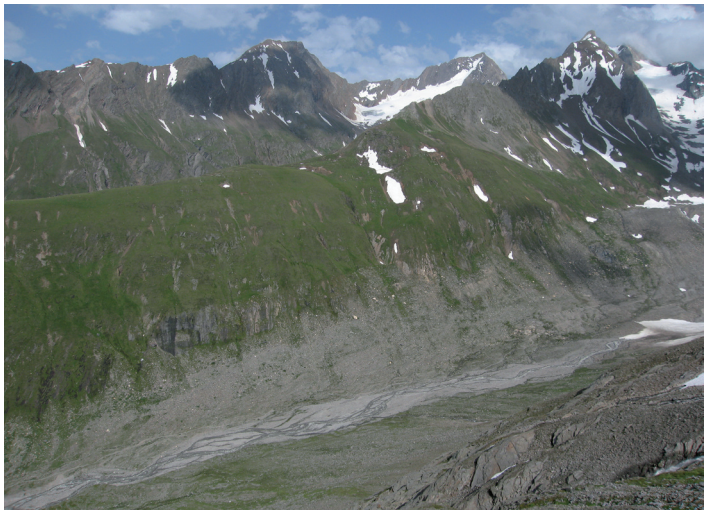

Abb. 4:
Innerer Talbereich des Romtoostales mit dem Hohe Mut Rücken auf der orographisch rechten Seite (Bildzentrum), der nach Südosten in den Kamm des Kirchenkogels übergeht. Am Unterhang hebt sich das Gletschervorfeld des Rotmoosferners anhand des Gerölls deutlich von den darüberliegenden, vegetationsbedeckten Seitenhängen ab. (Foto: E. Schwienbacher)

Abb. 5:
Äußerer, orographisch rechter Talbereich des Rotmoostales mit den von der Hohen Mut herabführenden, wärmebegünstigten, süd- bis südwestexponierten Hängen, wo sich auf Braunerdekolluvien gras- und krautreiche Zwergstrauchgesellschaften ausgebildet haben (Neuwinger 1987). Im Talboden finden sich kleinere Schwemmfächer, die in das große Rotmoosmoor übergehen, welches von der Rotmoosache mit ihren ausgeprägten Bachalluvionen nach Süden begrenzt wird.
(Foto: E. Schwienbacher)

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

sich außerdem häufig im Einflussbereich einer Föhnmauer (vgl. Kap. 3), die zur Beschattung des Talschlusses führt, während der Großteil des Tales noch vom Sonnenschein profitiert. Gleichzeitig scheint die Bewindung auf den zum Rotmoostal abfallenden Hängen der Hohen Mut gering zu sein, da sie im Lee der vorherrschenden Höhenströmung aus Nordwest liegen (Neuwinger 1987). Niederschlagsmengen, Sonnenscheindauer und Bewindung wirken sich auf die Schneemächtigkeit, den Ausaperungszeitpunkt, die Energiebilanz und in Folge auch auf die Bodenentwicklung aus.

Verwitterung

Im Hochgebirge nimmt die physikalische Verwitterung bedingt durch häufigere Temperaturextreme zu, während biologisch-chemische Verwitterungsprozesse vor allem auf Grund der niedrigen Temperaturen und der langen Schneedeckung langsamer verlaufen (Veit 2002). Dies gilt im verstärkten Ausmaß für vegetationsfreie Pionierstandorte. Diese Standorte sind häufiger Gefrier-Tau-Zyklen ausgesetzt, da die isolierende Vegetationsschicht fehlt und sich die Rohböden bei starker Sonneneinstrahlung rasch erhitzen und in

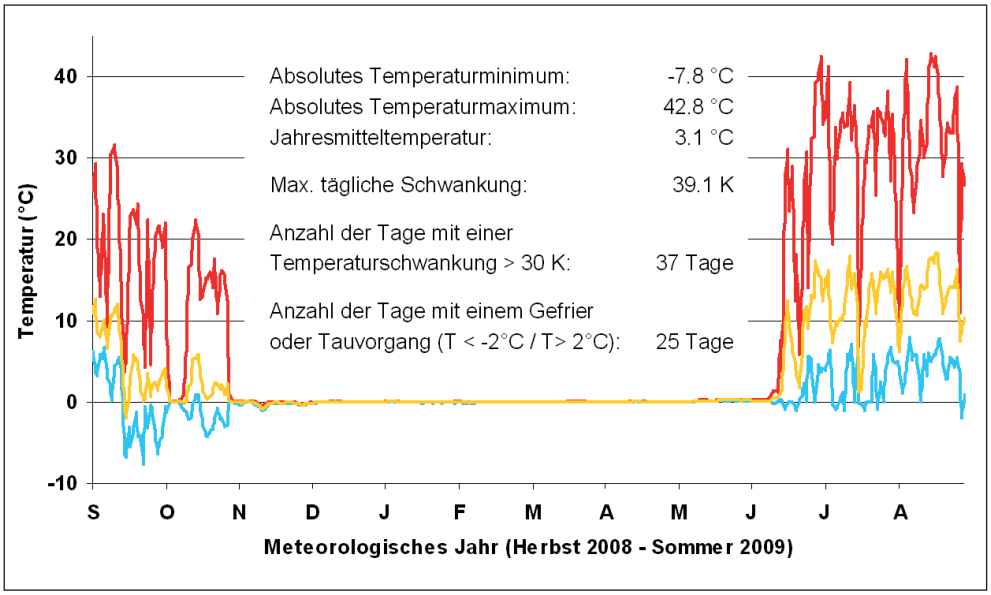

Abb. 6:
Jahresgang der Bodenoberflächentemperatur eines Pionierstandortes im Gletschervorfeld des Rotmoosferners (1971er Moräne). Dargestellt sind Tagesminimum (blau), -mittelwert (orange) und -maximum (rot). (Quelle: AG Stressphysiologie und Klimaresistenz u. AG Geobotanik, Institut für Botanik, Univ. Innsbruck, unpubl. Daten)

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

der Nacht schnell auskühlen. Frostsprengungen treten vor allem im Herbst, teilweise auch im Frühjahr auf, wenn noch keine mächtige Schneedecke ausgebildet ist bzw. bereits wieder fehlt (Abb. 6). Weiters zählen auch Temperatursprengungen zu den dominierenden Verwitterungsprozessen, da Temperaturschwankungen von 30 – 40 K innerhalb eines Sommertages, vor allem auf offenen Rohböden, regelmäßig vorkommen (Abb. 6).

Der Grad der Verwitterung bestimmt die Verteilung der Korngrößen und beeinflusst somit wesentlich die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Bodens. Kleinräumig heterogene Ausgangssituationen (Substrat, Relief, Wassereinfluss, Mikroklima, Oberflächenstruktur) sind charakteristisch für die Verhältnisse im Gletschervorfeld. Gemeinsam mit weiteren Boden bildenden Faktoren, vor allem der Vegetation, der Bodenfauna und der Bodenmikroorganismen, bestimmen sie die Verwitterungsgeschwindigkeit und die Dauer bis zur Ausbildung eines initialen Humushorizontes. Mit zunehmender Mineralisation und Humusanreicherung werden die physikalisch-chemischen Eigenschaften vom entstehenden Bodentyp und dem Bodengefüge geprägt (Mückenhausen 1993).

Erosion

Die Entwicklung des Bodens läuft im Hochgebirge nicht ungestört ab. So ist der Faktor Zeit zwar wesentlich, jedoch wird diese gerichtete Entwicklung häufig unterbrochen oder in ein früheres Stadium zurückversetzt. Im Gletschervorfeld sind Störungen geradezu charakteristisch. Kontinuierliche Erosionserscheinungen, bedingt durch Wind und Was-

Abb. 7:
Lawinenkegel im inneren Bereich des Rotmoostales. Mit dem Schnee werden auch größere Mengen an Boden- und Pflanzenmaterial von den Seitenhängen in das Gletschervorfeld transportiert. (Foto: E. Schwienbacher)

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

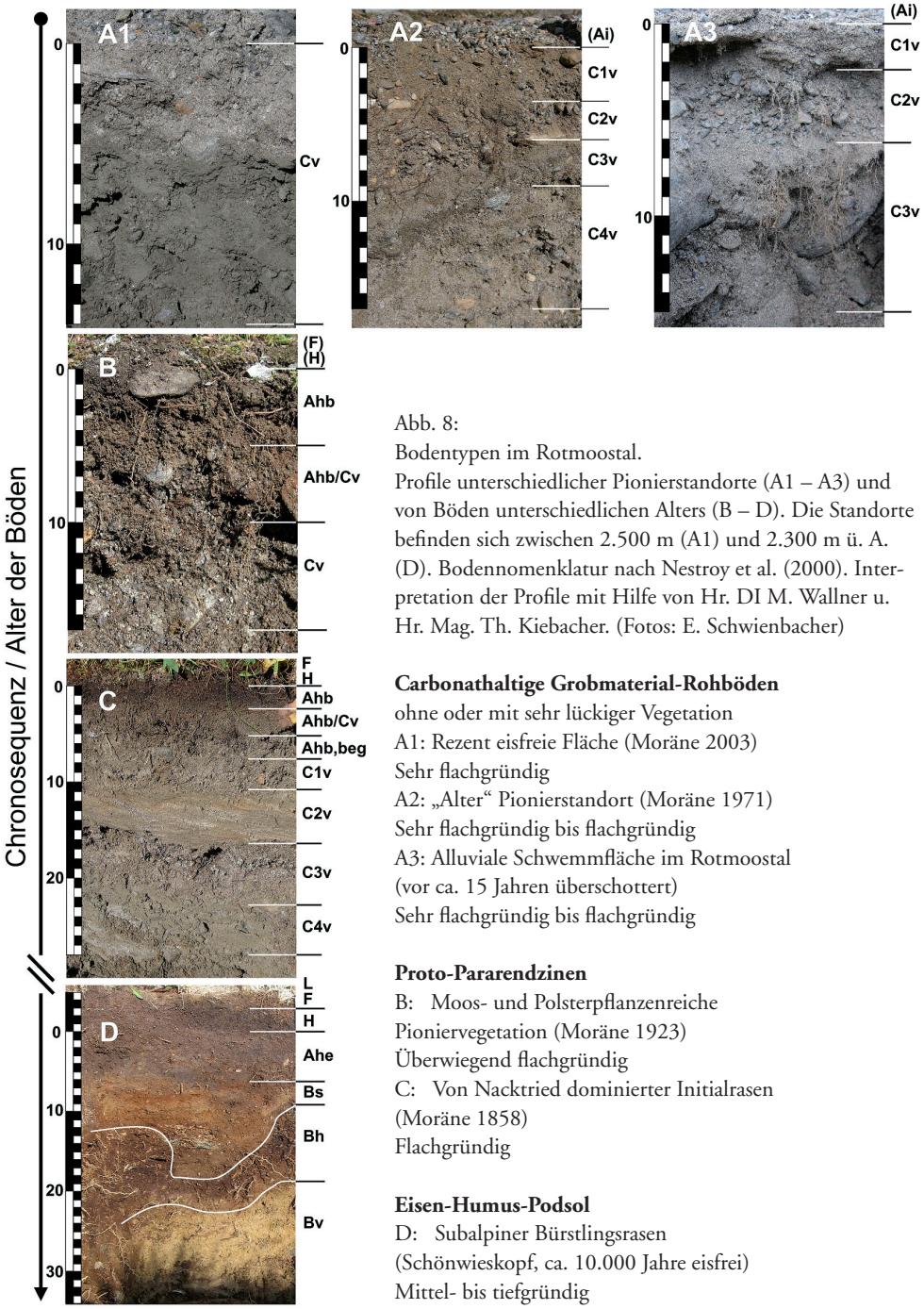

Abb. 8:
Bodentypen im Rotmoostal.
Profile unterschiedlicher Pionierstandorte (A1 – A3) und von Böden unterschiedlichen Alters (B – D). Die Standorte befinden sich zwischen 2.500 m (A1) und 2.300 m ü. A. (D). Bodennomenklatur nach Nestroy et al. (2000). Interpretation der Profile mit Hilfe von Hr. DI M. Wallner u. Hr. Mag. Th. Kiebacher. (Fotos: E. Schwienbacher)

Carbonathaltige Grobmaterial-Rohböden
ohne oder mit sehr lückiger Vegetation
A1: Rezent eisfreie Fläche (Moräne 2003)
Sehr flachgründig
A2: „Alter" Pionierstandort (Moräne 1971)
Sehr flachgründig bis flachgründig
A3: Alluviale Schwemmfläche im Rotmoostal
(vor ca. 15 Jahren überschottert)
Sehr flachgründig bis flachgründig

Proto-Pararendzinen
B: Moos- und Polsterpflanzenreiche Pioniervegetation (Moräne 1923)
Überwiegend flachgründig
C: Von Nacktried dominierter Initialrasen (Moräne 1858)
Flachgründig

Eisen-Humus-Podsol
D: Subalpiner Bürstlingsrasen
(Schönwieskopf, ca. 10.000 Jahre eisfrei)
Mittel- bis tiefgründig

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

ser, aber auch größere Einzelereignisse, wie Hangrutschungen, Lawinenabgänge oder Vermurungen, führen zu Abtragungen, Um- und Überlagerungen von Bodenschichten (Abb. 7). Sie können dazu führen, dass Standorte, die bereits viele Jahrzehnte eisfrei sind, nach wie vor keinen oder nur einen rudimentären Humushorizont aufweisen (Abb. 8.A2-A3). Diese Störungen spiegeln sich auch in der Horizontabfolge von bereits weiterentwickelten Böden wider (Abb. 8.C-D).

Felsstürze, Lawinen, Muren und episodische Überflutungen dürften, neben den geomorphologischen Gegebenheiten, auch hauptverantwortlich für die Unterschiede im Sukzessionsverlauf der beiden Talseiten im Rotmoostal sein (Abb. 2, Abb. 4), da auf der orographisch linken Talseite die Überformung der natürlichen Entwicklung wesentlich stärker ausgeprägt ist (Rudolph 1991, Schwienbacher 2004). Obwohl auf der linken Talseite der Hangfuß von vielen Schuttkegeln überzogen ist (Abb. 2), führt der kontinuierliche Eintrag von Feinmaterial auf der meist breiteren Talsohle zum Rückgang des Grobskeletts an der Bodenoberfläche im Gletschervorfeld (Abb. 9) und die Vegetationsdeckung nimmt entlang der Chronosequenz kontinuierlich zu (Schwienbacher 2004). Dort findet man auch deutlich ausgebildete Schwemmfächer (Abb. 2), die durch zahlreiche Rinnen und Rücken zergliedert sind und die Oberflächenform der Talsohle prägen (Rudolph 1991). Auf der rechten Talseite sind diese Verebnungen vor allem in den älteren Gletschervorfeldabschnitten wesentlich kleinflächiger. Das Schutt- und Blockmaterial der Grund- sowie Seitenmoränen befindet sich großteils noch an der Bodenoberfläche (Abb. 2, Abb. 9). Mit Wasser, Schnee und

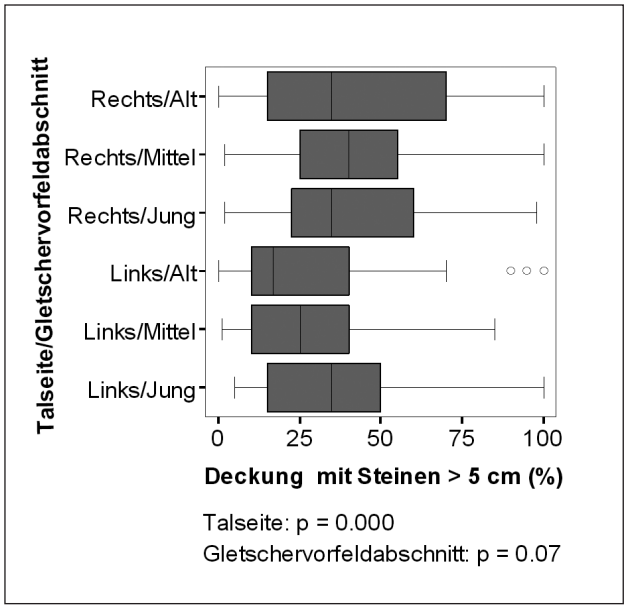

Abb. 9:
Vergleich des Grobskelettanteils der Bodenoberfläche zwischen den beiden Talseiten (orographisch links, orographisch rechts) und Gletschervorfeldabschnitten unterschiedlichen Alters. Erhoben wurden 439 Flächen á 1 m². Jung: 1981er – 1956er Moränen; Mittel: 1921er – 1956er Moränen; Alt: 1858er – 1921er Moränen (Quelle: verändert nach Schwienbacher 2004).

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Schutt gelangen auch Pflanzenmaterial und verschiedenste Bodenorganismen in das Gletschervorfeld, welche die Sukzession ganz wesentlich antreiben.

Kolluviale Bodenbildungen

Wird der Oberboden von Schmelzwasser durchweicht kann es bei ausreichendem Gefälle zu wiederholten Rutschungen auf den hangparallelen Gesteinsschichten kommen (Neuwinger 1987). Am Hangfuß oder in konkaven Geländeformen kommt es in Folge zur Ablagerung des humosen Bodenmaterials. Böden, die durch solche natürlichen Verlagerungsprozesse entstehen, werden Kolluvien genannt. Sie sind durch eine gestörte Horizontabfolge im Bodenprofil gekennzeichnet. Diese Phänomene sind im Rotmoostal vor allem an den Seitenhängen der Hohen Mut (Abb. 5) zu beobachten (Neuwinger 1987).

Bodentypen im Rotmoostal

Rohboden

Das Ausgangsstadium der Bodenentwicklung in der Primärsukzession eines Gletschervorfeldes, also nach Freigabe des chemisch unveränderten Substrates durch Abschmelzen des Eiskörpers, bilden Rohböden, welche aus abgelagertem Moränenmaterial bestehen (Abb. 8.A1). Im Rotmoostal sind diese Rohböden häufig sehr flachgründig (Abb. 8.A1-A2), stellenweise tritt sogar noch der anstehende Fels zutage. Durch die Dynamik des Gletschers und des abfließenden Schmelzwassers können sich lokal auch tiefgründigere Schuttansammlungen bilden. Die Alluvionen des Gletscherbaches, die noch episodisch umgelagert werden, zeigen ebenfalls die Merkmale eines Rohbodens (Abb. 8.A3) und auch in der subnivalen und nivalen Stufe, wo sich auf Grund der kurzen Vegetationsperiode nur eine spärliche Pflanzendecke ausbildet, geht die Bodenentwicklung meist nicht über die Rohböden hinaus (Abb. 10). Trotz der unterschiedlichen Gründigkeit des teils beträchtlichen Anteils an Feinboden und des variierenden Karbonatgehalts sind im Rotmoostal alle Pionierstandorte im Gletschervorfeld und die rezenten Alluvionen der Rotmoosache den karbonathaltigen Grobmaterial-Röhboden (*sensu* Nestroy et al. 2000) zuzuordnen.

Bereits ein spärlicher Bewuchs mit Pionierpflanzen führt zu einem Initialstadium der Bodenentwicklung über lockerem Ausgangsmaterial. So berichteten Erschbamer et al. (1999) von Humusansammlungen unter *Saxifraga aizoides* Polstern auf ca. 30 Jahre eisfreien Flächen. Die Anhäufung von organischem Material erfolgt jedoch nicht lückenlos. Das Bodenprofil ist auf einen rudimentär

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Abb. 10:
Grobmaterial-Rohboden mit spärlichem Polsterpflanzen-Bewuchs im subnivalen Bereich des inneren Rotmoostales. Der Standort befindet sich auf 3.150 m Meereshöhe im obersten Bereich der sogenannten „Liebener Rippe", einem Felsrücken der westlich der Liebener Spitze in das Rotmoostal hinabführt.
(Foto: E. Schwienbacher)

entwickelten Humushorizont (Ai) beschränkt und ein Mineralbodenhorizont fehlt (Abb. 8.A2).

Pararendzina

Nimmt die Vegetationsdeckung deutlich zu, so kommt es zur Ausbildung eines durchgehenden A-Horizonts. Die Akkumulation von organischem Material in einem Auflagehorizont ist weiterhin kaum feststellbar, nur unter bestimmten Pflanzen wird ein Auflagehumus gebildet. Erschbamer et al. (1999) stellten auf der 1923er Seitenmoräne eine flachgründige Pararendzina mit einem mehrere Zentimeter mächtigen A-Horizont fest (Abb. 8.B). Sowohl der deutliche Karbonatgehalt im gesamten Gletschervorfeld, als auch das Vorkommen von zahlreichen kalkholden Pflanzen (vgl. Kap. 6) begründen die Zuordnung dieser Böden zur Entwicklungsreihe der Kalk-Silikat-Mischgesteine.

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Manche Rohböden bzw. A-C-Böden des Rotmoos- als auch des Gaisbergtales wurden bei fehlendem Kalkeinfluss auch als Silikatsyroseme bzw. Ranker eingestuft (Neuwinger 1987, Starnberger 2006). Die Böden auf den ältesten Moränen der orographisch rechten Seite, die bereits einen geschlossenen Initialrasen aufweisen, sind zwar etwas tiefgründiger, aber weiterhin den A-C-Böden zuzuordnen (Erschbamer et al. 1999). Hier sind auch Störungen in der Horizontabfolge festzustellen, die vermutlich auf fluviatile Ablagerungen einzelner Horizonte bzw. Materialeintrag durch Hangrutschungen zurückzuführen sind (Abb. 8.C).

Schwemmboden

Für die flachen Bereiche in der Talsohle, vor allem auf der orographisch linken Seite, die im Einflussbereich der Seitenbäche oder der längs verlaufenden Gerinne stehen (Abb. 2), sowie für die nur selten und mäßig gefluteten Bereiche entlang der Rotmoosache, sind großteils glacio-fluviatil gebildete, flach- bis mittelgründige Böden anzunehmen. Diese Bereiche werden im Hochsommer während des tageszeitlichen Anstiegs der Gletscherabflüsse regelmäßig von Schmelzwasser überrieselt. Dabei wird mittransportiertes Feinsediment abgelagert, so dass der Sandgehalt im Oberboden hoch sein dürfte. Da sich auf solchen Schwemmböden auf Grund des lockeren Pflanzenbewuchses wenig organisches Material anreichert, ist der Humushorizont typischerweise nur rudimentär entwickelt und ein eigentlicher A-Horizont fehlt. Häufig können begrabene Horizonte differenziert werden (Nestroy et al. 2000). Solche episodisch überfluteten Böden sind zu den Schwemmböden zu stellen, bei denen die Korngrößen kaum sortiert vorliegen (Nestroy et al. 2000). Eine Beschreibung eines solchen Bodentyps aus dem Rotmoostal lieferten Erschbamer et al. (1999), die einen alpinen Schwemmmboden auf der 1923er Grundmoräne beschrieben.

Braunerde und Podsol

Außerhalb des Gletschervorfeldes, das mit der End- und den Seitenmoränen von 1858 klar umgrenzt ist (vgl. Kap. 7), findet man im Rotmoostal vor allem am Seitenhang der Hohen Mut (Abb. 5) flach- bis mittelgründige A-B-C-Böden. Diese Bereiche sind zwar seit nahezu 10.000 Jahren eisfrei, aber die eigentliche Bodengenese scheint wesentlich jünger zu sein (Patzelt und Bortenschlager 1979). Auf diesen wärmebegünstigten Hanglagen kam es vermutlich auch zu einer Beeinflussung der Bodengenese durch die menschliche Bewirtschaftung (Neuwinger 1987). Beweidung dürfte die bereits unter natürlichen Umständen gegebenen abwärtsgerichteten Materialverlagerungen nochmals begünstigt haben. Dadurch entstanden die Braunerde-Kolluvien, die

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

man vor allem unter kräuterreichen Weiderasen und grasreichen Zwergstrauchgesellschaften findet (Neuwinger 1987). Auf der linken Talseite, an den Nordosthängen des Hangerermassivs (Abb. 3), wurde von Starnberger (2006) ebenfalls eine flachgründige Braunerde vorgefunden, während auf Verebnungen der Hohen Mut unter Krummseggenrasen auch tiefgründige Braunerden vorhanden sind. Die Mächtigkeit dieser Böden könnte auf den Eintrag von äolisch transportiertem Feinmaterial aus vegetationsfreien Bereichen zurückgehen (Neuwinger 1987, Starnberger 2006). Die Braunerdeböden weisen im Oberhangbereich der Hohen Mut oft Pseudovergleyungen auf und gehen unter Schneebodenvegetation in Frostgleye (*sensu* Neuwinger 1987) über.
Böden aus der Podsolserie mit deutlich ausgebildeten Profilen finden sich im Rotmoostal als pseudovergleyte Podsolkolluvien am Hangfuß der Hohen Mut (Neuwinger 1987, Abb. 5). Auch am Schönwieskopf (Abb. 3) wurde unter einem Bürstlingsrasen ein Eisen-Humus-Podsol vorgefunden, der allerdings Anzeichen von Störungen im B-Horizont aufweist (Abb. 8.D). Neuwinger (1987) geht davon aus, dass die Bildung der Böden der Podsolserie zu Zeiten stattfand, als diese Bereiche noch bewaldet waren. Diese Interpretation steht im Einklang mit den Pollenfunden im Schönwiesmoor (vgl. Kap. 4).

Hydromorphe Böden

Als besondere Bodentypen der gletschergeformten Täler im Bereich von Obergurgl, wenn auch nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Gletscherdynamik stehend, kommen hydromorphe Böden, vor allem An- und Niedermoore, vor. Neben den zahlreichen kleinflächigen Mooren, sind es vor allem das große Namens gebende ‚Moos' am Eingang des Rotmoostales und der Moorbereich am Hangfuß des Hangerers und des Schönwieskopfs (Abb. 3), die überregionale Bedeutung erlangt haben (vgl. Kap. 4). Im Einflussbereich von stehendem bzw. langsam fließendem Grund- und Hangwasser hat sich hier, durch Anreicherung organischer Substanz unter vorwiegend anaeroben Bedingungen, ein z.T. mehrere Meter hoher Torfhorizont gebildet (vgl. Kap. 4).

Bodentextur

Die Bodentextur, oder die Körnung des Bodens, hängt vom Ausgangsgestein und dem Verwitterungsgrad ab. Zahlreiche Eigenschaften des Bodens, vor allem sein Wasser- und Lufthaushalt, werden von der Zusammensetzung der Korngrößenfraktionen bestimmt (Scheffer und Schachtschabel 1998). Der Anteil an Feinmaterial bestimmt die Wasserhaltekapazität und

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

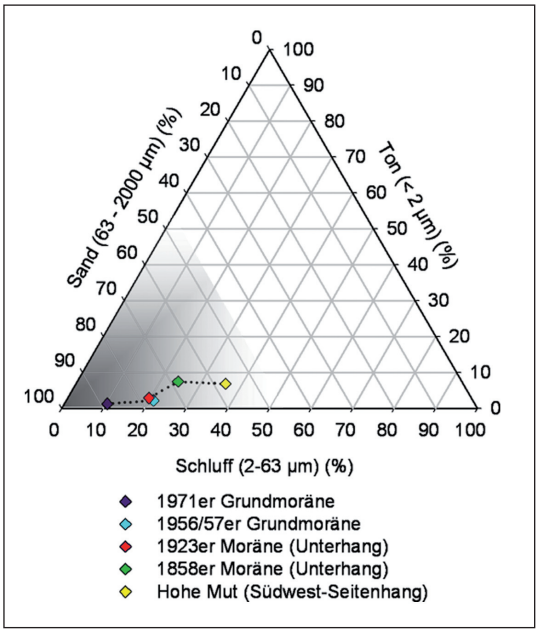

Abb. 11:
Korngrößenanteile im Feinboden auf verschiedenen Moränen entlang der Chronosequenz und einer Referenzfläche außerhalb des Gletschervorfeldes zur Charakterisierung der Bodenart. Das grau hinterlegte Eck kennzeichnet den Bereich der Sandböden (Quelle: verändert nach Erschbamer et al. 1999).

das für Organismen verfügbare Wasser. Bei den Rohböden im Rotmoostal handelt es sich um reine Sandböden und erst durch die Mineralisation organischer Bestandteile nimmt der Anteil an Schluff und Ton zu, so dass z.B. an den Seitenhängen der Hohen Mut ein Sand-Schluff-Boden festgestellt wurde (Abb. 11), der eine deutlich höhere Wasserhaltekapazität aufweist. Die Bodenfeuchte beeinflusst direkt die biologische Aktivität des Standortes und somit die Bodenentwicklung. Trocknet der Oberboden zu schnell und zu häufig aus, erschwert dies die Ansiedelung von Pflanzen. Dieses Phänomen konnte selbst auf seit 35 Jahren eisfreien Flächen noch beobachtet werden, wo die Keimlinge verschiedener Pionierpflanzen extrem hohe Mortalitätsraten aufwiesen (Niederfriniger Schlag und Erschbamer 2000, E. Schwienbacher, unpubl. Daten). Auf diesen nahezu vegetationsfreien Flächen überwiegte im Feinboden der Grobsand und wies einen geringeren Anteil der kleineren Korngrößen auf (Abb. 1.B, Abb. 8.A2). Im Sommer 2008 wurde an diesem Standort an 19 Tagen eine extreme Austrocknung des Oberbodens festgestellt (Abb. 1.A). Auf Rohböden mit ausreichender Bodenfeuchte siedeln sich hingegen die ersten pflanzlichen und tierischen Organismen bereits in den ersten Jahren nach Abschmelzen des Eises an (vgl. Kap. 6 und 7). Auf einem solchen Pionierstandort wurde ein höherer Anteil der kleinsten Korngrößenfraktionen (< 0,63 mm) festgestellt und der Oberboden trocknete während der gesamten Vegetationsperiode niemals komplett aus (Abb. 1.B, Abb. 8.A1).

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

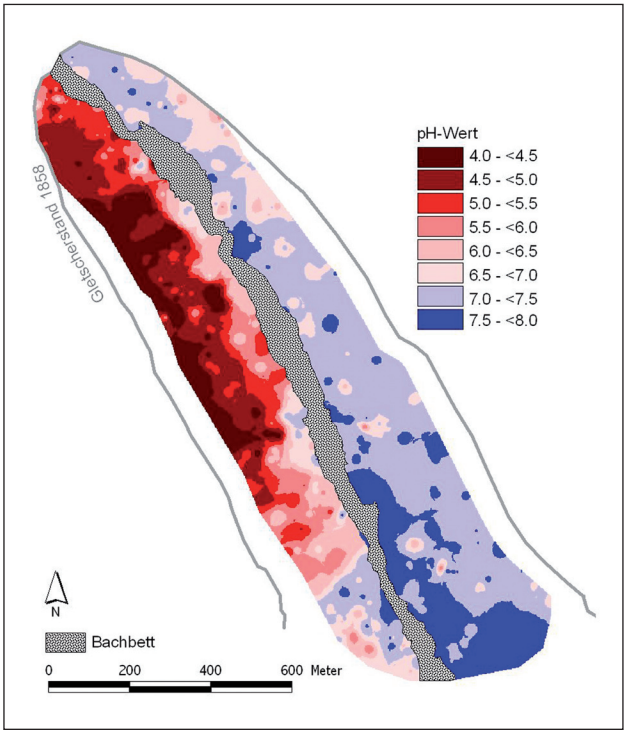

Abb. 12:
Bodenreaktion des obersten Horizonts im Gletschervorfeld des Rotmoosferners. Interpolierte Werte aus pH Messungen (0,01-m $CaCl_2$-Suspension) von 570 Bodenproben.
(Quelle: Schwienbacher 2004)

Bodenreaktion

Die Bodenreaktion, also der Säure- und Basengehalt des Bodens, ist eine wesentliche Eigenschaft und beeinflusst entscheidend die Verwitterung, das Bodengefüge und die Verfügbarkeit von Nährstoffen (Mückenhausen 1993). Zu Beginn der Bodengenese wird die Bodenreaktion primär durch das Ausgangsgestein bestimmt. Ein Großteil des Rotmoostales fällt in die Zone der Paragneise und mineralreichen Glimmerschiefer (vgl. Kap. 2). Auf diesen Gesteinen bildet sich im Normalfall ein saurer Humusboden aus (Reisigl 1987). Der südliche Talbereich befindet sich jedoch im Einflussbereich des Schneeberg Komplexes, wodurch die Gesteine karbonatreich sind. Dies kommt je nach Talseite und -abschnitt unterschiedlich zum Tragen. Erhebungen der potentiellen Bodenreaktion im Gletschervorfeld (Abb. 12) lieferten durchwegs geringere pH-Werte auf der linken Talseite als auf vergleichbaren Standorten auf der rechten Talseite (Mallaun 2001, Schwienbacher 2004). Die jüngsten Moränen weisen pH-Werte über 7,0 auf. Auf der orographisch linken Talseite nehmen diese Werte bereits auf 30 Jahre eisfreien Flächen deutlich ab und mit zunehmendem Alter der Moränen tritt eine Versauerung der Böden ein. So weisen vor allem hangnahe Bereiche pH-Werte von 4,0 bis 4,5 auf (Abb. 12). Auf der rechten Talseite tritt diese Entwicklung wesentlich später auf und nur tiefgründigere Böden der ältesten Seitenmoränen weisen im Oberboden deutlich saure Verhältnisse auf. Als Folge dieser meist neutralen bis leicht basischen

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Böden im Gletschervorfeld, bildete sich eine Vegetation mit zahlreichen basiphilen Elementen aus (Jochimsen 1962, Rudolph 1991, Erschbamer et al. 1999, Mallaun 2001, Schwienbacher 2004, Raffl et al. 2006). Auf den Seitenhängen der Hohen Mut außerhalb des Gletschervorfeldes, auf denen Neuwinger (1987) flachgründige Braunerdekolluvien identifizierte, lag der pH bei 4,3 (Erschbamer et al. 1999), während Starnberger (2006) auf der gegenüberliegenden Talseite am Fuß des Hangerers in einer Braunerde eine pH-Zahl von 4,9 ermittelte und R. Kaufmann (Univ. Innsbruck, unpubl. Daten) am Schönwieskopf-Werte von 4,0 in einem Podsol feststellte.

Die Abnahme des pH-Wertes entlang der Chronosequenz ist charakteristisch für die Bodengenese (Matthews 1992) und bestätigt sich auch im Rotmoostal. Die pH-Werte spiegeln dabei einerseits den Grad der Bodenentwicklung wider (Erschbamer et al. 1999), andererseits wird die Bodenreaktion auch sehr stark von den vorhandenen Pflanzenarten (Crocker und Major 1955) und den mit ihnen assoziierten mikrobiellen Gemeinschaften beeinflusst. Der pH-Wert im Bereich der Rhizosphäre unterscheidet sich in späteren Sukzessionsstadien deutlich vom angrenzenden Bodenmaterial (Deiglmayr et al. 2006). Die Ausgangssituation und die Störungseinflüsse können die Änderung der Bodenreaktion ebenfalls beeinflussen. So sind die Gletschervorfeldbereiche auf der orographisch linken Talseite weitgehend von Muren- und Schwemmkegeln der von den Gletschern nördlich des Vorderen Seelenkogels herabführenden Bächen überformt (Abb. 2). Diese Gletscher überlagern geologische Bereiche, die kaum Einlagerungen des Schneebergzugs aufweisen (Schmidegg 1932), und daher kein basisch verwitterndes Gestein eintragen. Bei diesen Seitenbächen wurde ein pH von 6,4 festgestellt, während die Seitenbäche der orographisch rechten Seite einen pH von rund 8,0 aufwiesen (Burger 1999, Wallinger 1999). Dort, wo diese Ablagerungen der Seitenbäche wiederum von der Rotmoosache beeinflusst werden, finden sich weniger saure Bereiche (Abb. 12).

Bodenelemente

Organische Substanz

Die Limitierung der organischen Substanz im Boden zu Beginn der Primärsukzession und die Zunahme im Laufe der Zeit ist das deutlichste Merkmal der Bodenentwicklung. Wenngleich auf den jüngsten Stadien bereits Mikroorganismen und Bodenfauna zur Akkumlation von organischer Substanz beitragen (Schmidt et al. 2008), so sind es in Folge vor allem pflanzliches Streumaterial und Wurzelteile. Der Anstieg des Humusgehalts im Boden zeigt sich im Allgemeinen auch in den

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Studien, die im Rotmoostal durchgeführt wurden (Erschbamer et al. 1999, Kaufmann et al. 2002, Tscherko et al. 2005, Deiglmayr et al. 2006). Die Anreicherung der organischen Substanz im Oberboden erfolgt im Vergleich zu anderen Lokalitäten jedoch relativ langsam (vgl. Matthews 1992). Die Böden entwickelten sich im Laufe einiger Jahrzehnte von humusfrei zu gering humos (organische Substanz ~ 5 %), wobei auf der rechten Talseite des Gletschervorfeldes der Anteil an organi-

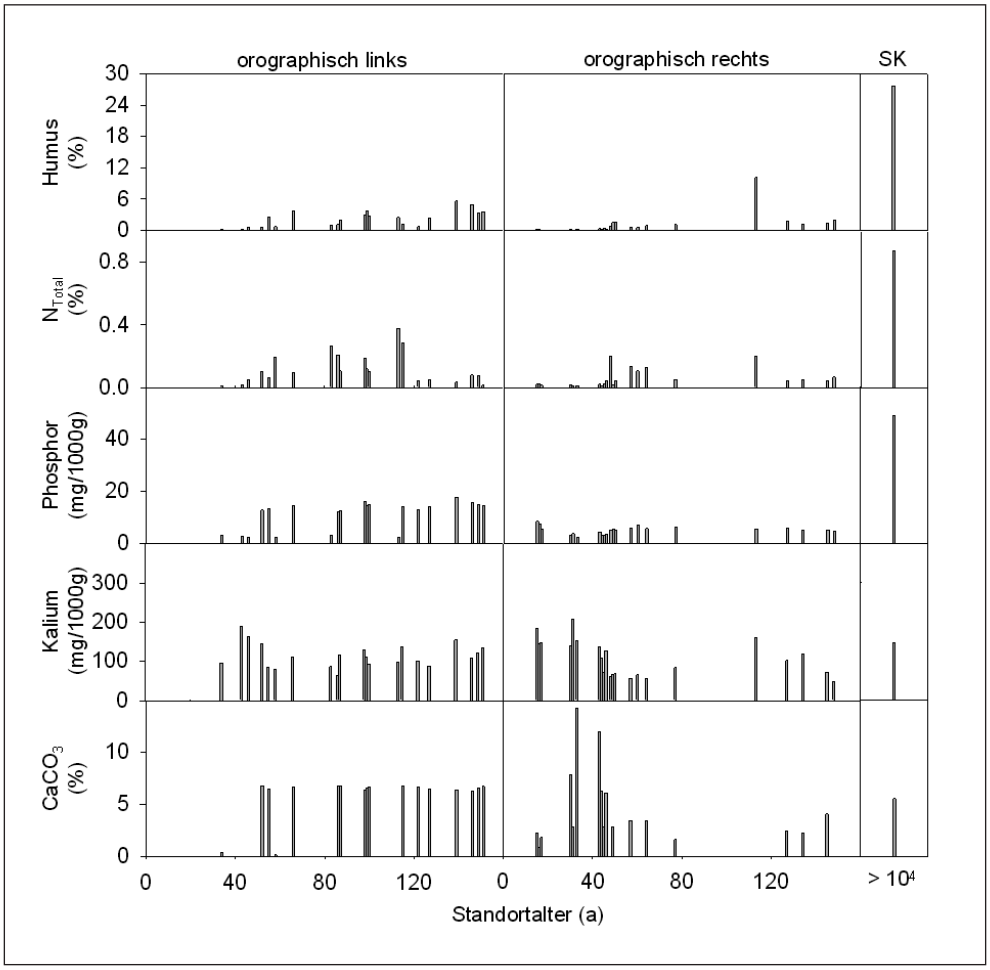

Abb. 13:
Ausgewählte Bodenelemente im Oberboden unterschiedlich alter Sukzessionsstadien der orographisch linken und rechten Talseite des Gletschervorfeldes im Rotmoostal im Vergleich mit einem Referenzstandort am Schönwieskopf (SK), auf welchem ein subalpiner Bürstlingsrasen ausgebildet ist (Quelle: R. Kaufmann, Univ. Innsbruck, unpubl. Daten).

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

scher Substanz geringer bleibt (Abb. 13). Die Anreicherung hängt nicht nur vom Zeitfaktor ab, auch die Beschaffenheit der Streu spielt eine zentrale Rolle. Diese wird wiederum von der vorhandenen Vegetation bestimmt und steht in enger Wechselwirkung mit weiteren Boden bildenden Faktoren. Sind die mikroklimatischen Bedingungen ungünstig für den Streuabbau, kommt es zur verstärkten Bildung von organischen Auflagen. Ein schneller Abbau der Streuschicht kann Ursache für einen geringmächtigen Auflagehorizont sein. Im Gletschervorfeld findet man kleinräumig starke Abweichungen der Boden bildenden Faktoren und somit auch der Bodengenese. Die Böden weisen z.T. einen Anteil an organischer Substanz von bis zu 10 % auf (Abb. 12, vgl. auch Erschbamer et al. 1999). Die Heterogenität der Standorte dürfte auch einer der Hauptgründe für die teils stark variierenden Werte zwischen unterschiedlichen Studien sein (Erschbamer et al. 1999, Kaufmann et al. 2002, Tscherko et al. 2005, Deiglmayr et al. 2006). Aber auch die Beeinflussung der Bodengenese durch Düngung, die auf Grund der Beweidung durch Schafe und Pferde gegeben ist, sollte bei der Interpretation der Daten nicht vernachlässigt werden. Außerhalb des Gletschervorfeldes wurde eine deutliche Zunahme der organischen Substanz im Boden festgestellt, so dass der Gehalt an organischer Substanz im Oberboden der Braunerdekolluvien und Podsole bis über 25 % steigt (Abb. 12, vgl. auch Erschbamer et al. 1999, Kaufmann et al. 2002, Tscherko et al. 2005, Deiglmayr et al. 2006).

Die Boden-Makronährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium

Rezent eisfreie Terrains sind primär nährstofflimitiert, d.h. die für lebende Organismen notwendigen Bodenelemente sind nicht in ausreichendem Maß verfügbar. Vielfach sind die Nährstoffe zwar im Ausgangsgestein vorhanden, aber erst durch die Verwitterung werden sie für die Organismen verfügbar. Andere Nährstoffe, vor allem Stickstoff, werden erst durch die Bindung aus der Atmosphäre angereichert. Als deutliches Merkmal der Bodengenese akkumulieren sich einige Bodenelemente im Oberboden als Folge der Etablierung von Mikroorganismen, Invertebraten- und Pflanzengemeinschaften. Die Nährstoffanreicherung in jungen Stadien ist eine der Schlüsselmechanismen für das Fortschreiten der Sukzession (Hodkinson et al. 2002).

Entsprechend den Erwartungen war auf den Pionierstadien im Rotmoostal kaum Stickstoff im Boden festzustellen. Die Entwicklung der Stickstoff-Verhältnisse zeigte keine generelle Zunahme mit dem Alter der Sukzessionsstadien (Abb. 13). Die höchsten Werte wurden im mittleren Gletschervorfeldabschnitt (ca. 50 – 120 Jahre eisfrei) gemessen, während der Stickstoffgehalt auf älteren Moränen wieder deutlich abnimmt (Abb. 13). Die

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

von Crocker und Major (1955) berichtete Entwicklung des Gesamtstickstoffes im Boden des Gletschervorfeldes der Glacier Bay Region zeigt eine weitgehende Übereinstimmung dieses Verlaufs. Die Ursache dafür könnte an der Änderung des Vegetationstyps und einem damit verbundenen Rückgang der Stickstofffixierungsrate liegen. Auf älteren Stadien anderer Ökosysteme wurde auch eine zunehmende Verlagerung des Stickstoffs in tiefere Bodenschichten beobachtet. Der Gesamtstickstoffgehalt zeigt auch nicht die ganze Variabilität des Stickstoff-Kreislaufs. So fanden Deiglmayr et al. (2006), dass im Rotmoostal zwar die Ammonium-Konzentration dem Trend des ansteigenden Humusgehaltes folgt, jedoch der Nitrat-Gehalt auf allen Sukzessionstadien sehr niedrig blieb. Auch Kaufmann et al. (2002) berichteten, dass der Nitrat-Gehalt nicht mit dem Alter der Stadien korreliert, jedoch von der Sonnenscheindauer beeinflusst wird.

Im Gletschervorfeld des Rotmoosferners fielen auf den jüngsten Stadien die relativ hohen Werte beim Phosphor- und noch mehr beim Kalium-Gehalt (siehe auch Tscherko et al. 2005) auf. Diese Werte dürften die Verhältnisse in den Ausgangsgesteinen widerspiegeln. Die Entwicklung des Phosphorgehalts im Boden unterschiedlicher Gletschervorfelder zeigte keine einheitlichen Trends (Matthews 1992), jedoch scheint in sehr langen Entwicklungsreihen der Gesamtphosphorgehalt durch Auswaschungsverluste zurückzugehen. Im Rotmoostal nahm hingegen der Gehalt an Phosphor entlang der Chronosequenz leicht zu, allerdings war dieser Zusammenhang nur auf der orographisch linken Seite signifikant (Abb. 13), wo in vielen Bereichen ein ständiger Eintrag von Feinsedimenten aus höher gelegenen Gletscherabflüssen zu beobachten ist. Im Kalium-Gehalt spiegelte sich dieser „Düngungseffekt“ nicht wider. Auch sonst zeigten die Messwerte für Kalium keinen Zusammenhang mit der Chronosequenz (Abb. 13).

Die fehlenden Trends bei der Entwicklung der Bodenelemente im Rotmoostal deuten wiederum darauf hin, dass die Bodengenese in dieser Primärsukzession nicht ganz ungestört abläuft. Die Boden bildenden Faktoren im Gletschervorfeld variieren kleinräumig und schaffen sehr heterogene Bodenverhältnisse (Erschbamer et al. 1999, Kaufmann et al. 2002, Schwienbacher 2004).

Außerhalb des Gletschervorfeldes stieg der Gehalt an Nährstoffen, vor allem Stickstoff und Phosphor, jedoch sprunghaft an (Tscherko et al. 2005). Im Oberboden des Bürstlingsrasen am Schönwieskopf wurden nochmals deutlich höhere Anteile aller Nährstoffe nachgewiesen (Abb. 13). Diese sind vergleichbar mit den Verhältnissen, die Neuwinger (1987) vom Auflagehorizont eines Eisenpodsols im etwas tiefer gelegenen Alpenrosen-Zirbenwald berichtete. Während im Gletschervorfeld lediglich ein Anstieg des Phosphor-Gehalts mit zunehmendem Humusgehalt

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

entlang der Chronosequenz festgestellt wurde und sonst keine Zusammenhänge zwischen den Elementen auf den unterschiedlichen Standorten zu beobachten waren, nahm an den Standorten außerhalb des Gletschervorfeldes sowohl der Stickstoff-, als auch der Phosphorgehalt, mit der Menge an organischer Substanz deutlich zu. Neuwinger und Czell (1959) wiesen bei ihren Untersuchungen in Obergurgl nach, dass die Auflagehorizonte der alpinen Podsole und Braunerden den eigentlichen Speicher für pflanzenverfügbare Nährstoffe darstellen, und man bereits im Mineralboden nur mehr geringe Anteile der Elemente vorfindet. Im Auflagehorizont findet sich auch der höchste Durchwurzelungsgrad des Bodens mit Feinwurzeln. Nachdem im Gletschervorfeld die Humusauflage anfänglich nur kleinflächig und auch in älteren Stadien nur geringmächtig ausgebildet ist, dürften hier unter anderem Faktoren wie Ausgangssubstrat, Eintrag von Nährstoffen durch Materialverlagerungen, unterschiedliche Nährstoffbindung durch Organismen, aber auch Düngeeffekte durch die Beweidung eine übergeordnete Rolle für die Zusammensetzung der Bodenelemente spielen und so den Gradienten der Chronosequenz verwischen.

Karbonat

Der Anteil an Karbonatgesteinen beeinflusst die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens, wie beispielsweise die Gefügebildung (Krümelstruktur) und damit den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt (Sitte et al. 2002). Tscherko et al. (2005) berichteten von einem kontinuierlichen Rückgang des Karbonatgehalts im Laufe der Sukzession im Gletschervorfeld des Rotmoosferners, aber die Untersuchungen von R. Kaufmann (Univ. Innsbruck, unpubl. Daten) bestätigten dieses Bild nicht (Abb. 13). Auf der linken Talseite wurde ein gleichbleibender Anteil an Karbonat auf nahezu allen Probenstellen festgestellt, während auf der rechten Talseite der Karbonatgehalt allgemein etwas geringer ist, mit Ausnahme des ca. 30 – 45 Jahre eisfreien Abschnitts, an dem der höchste Karbonatgehalt von 14% festgestellt wurde, aber die Werte kleinräumig stark variieren. Auch am Schönwieskopf änderte sich der Karbonatgehalt im Vergleich zu den Durchschnittswerten im Gletschervorfeld nicht wesentlich (Abb. 13). Karbonat kann die Versauerung von schwach bis mäßig sauren Böden etwas puffern und ist für die Basenverfügbarkeit besonders wichtig (Mückenhausen 1993). Im Rotmoostal zeigte sich jedoch kein Zusammenhang zwischen dem Karbonatgehalt und dem Boden-pH. Während im Großteil des Gletschervorfeldes nur eine mäßige Versauerung der Böden durch Anreicherung von organischer Substanz zu beobachten war, dürfte diese auf der linken Talseite das Pufferungsvermögen der Böden übersteigen.

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Literatur

Aplet, G.H., Flint, H.R. & Vitousek, P.M. (1998) Ecosystem development on Hawaiian lava flows: biomass and species composition. J. Veg. Sci 9: 17-26.

Braun-Blanquet, J. & Jenny, H. (1926) Vegetationsentwicklung und Bodenbildung in der alpinen Stufe der Zentralalpen (Klimaxgebiet des Caricion curvulae). Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges. 63: 183-349.

Burger, R. (1999) Die Chiromidenemergenz zweier Hochgebirgsbäche im Raum Obergurgl (Rotmoosache, Königsbach, Tirol). Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Crocker, R.L. & Major, J. (1955) Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska. J. Ecol. 43: 427-448.

Crocker, R.L. & Dickson, B.A. (1957) Soil development on the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall Glaciers, South-Eastern Alaska. J. Ecol. 45: 169-185.

Deiglmayr, K., Philippot, L., Tscherko, D. & Kandeler, E. (2006) Microbial succession of nitrate-reducing bacteria in the rhizosphere of *Poa alpina* across a glacier foreland in the Central Alps. Environ. Microbiol. 8: 1600-1612.

Dolezal, J., Homma, K., Takahashi, K., Vyatkina, M.P., Yakubov, V., Vetrova, V.P. & Hara, T. (2008) Primary succession following deglaciation at Koryto Glacier Valley, Kamchatka. AAAR 40: 309-322.

Duelli, M.T. (1987) Die Vegetation des Gaißbergtales, Obergurgl, Ötztal. In: MaB - Projekt Obergurgl, Patzelt G. (ed) Veröff. d. österr. MaB-Programms 10, Innsbruck, 205-231.

Egli, M., Wernli, M., Kneisel C. & Haeberli, W. (2006a) Melting glaciers and soil development in the proglacial area Morteratsch (Swiss Alps): I. Soil Type Chronosequence. AAAR 38: 499-509.

Egli, M., Wernli, M., Kneisel, C., Biegger, S. & Haeberli, W. (2006b) Melting glaciers and soil development in the proglacial area Morteratsch (Swiss Alps): II. Modeling the present and future soil state. AAAR 38: 510-521.

Erschbamer, B., Bitterlich, W. & Raffl, C. (1999) Die Vegetation als Indikator für die Bodenbildung im Gletschervorfeld des Rotmoosferners (Obergurgl, Ötztal, Nordtirol). Ber. nat.-med. Verein Innsbruck 86: 107-122.

Friedel, H. (1934) Boden- und Vegetationsentwicklung am Pasterzen Ufer. Carinthia II 43/44: 29-41.

Friedel, H. (1938a) Boden- und Vegetations-Entwicklung im Vorfelde des Rhonegletschers. Ber. Geobot. Inst. Rübel 65-76.

Friedel, H. (1938b) Die Pflanzenbesiedlung im Vorfeld des Hintereisferners. Zeitschrift für Gletscherkunde 26: 215-239.

Haugland, J.E. & Haugland, B.S.O. (2008) Cryogenic disturbance and pedogenic lag effects as determined by the profile

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

developmental index: The styggedalsbreen glacier chronosequence, Norway. Geomorphology 96: 212-220.

He, L. & Tang Y. (2008) Soil development along primary succession sequences on moraines of Hailuogou Glacier, Gongga Mountain, Sichuan, China. Catena 72: 259-269.

Hodkinson, I.D., Webb, N.R. & Coulson, S.J. (2002) Primary community assembly on land - the missing stages: why are the heterotrophic organisms always there first? J. Ecol. 90: 569-577.

Insam, H. & Haselwandter, K. (1989) Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. Oecologia 79: 174-178.

Jochimsen, M. (1962) Die Vegetationsentwicklung in den Vorfeldern des Rotmoos- und Gaisbergferners im Ötztal. Dissertation, Universität Innsbruck.

Jochimsen, M. (1970) Die Vegetationsentwicklung auf Moränenboden in Abhängigkeit von einigen Umweltfaktoren. Alpin-Biologische Studien. Veröff. Univ. Innsbruck 46: 5-22.

Johnson, E.A. & Miyanishiate, K. (2008) Testing the assumptions of chronosequences in succession. Ecology Letters 11: 419-431.

Kandeler, E., Deiglmayr, K., Tscherko, D., Bru D. & Philippot, L. (2006) Abundance of *narG*, *nirS*, *nirK*, and *nosZ* genes of denitrifying bacteria during primary successions of a glacier foreland. Appl. Environ. Microbiol. 72: 5957-5962.

Kaufmann, R. (2001) Invertebrate succession on an alpine glacier foreland. Ecology 82: 2261-2278.

Kaufmann, R., Fuchs, M. & Gosterxeier, N. (2002) The soil fauna of an alpine glacier Foreland: colonization and succession. AAAR 34: 242-250.

Lazzaro, A., Abegg, C. & Zeyer, J. (2009) Bacterial community structure of glacier forefields on siliceous and calcareous bedrock. Eur. J. Soil Sci. 60: 860-870.

Lichter, J. (1998) Primary succession and forest development on coastal Lake Michigan sand dunes. Ecol. Monogr. 68: 487-510.

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. Ber. Geobot. Inst. Rübel 35-112.

Mahaney, W.C., Kalm, V., Kapran, B., Milner, M.W. & Hancock, R.G.V. (2009) A soil chronosequence in Late Glacial and Neoglacial moraines, Humboldt Glacier, northwestern Venezuelan Andes. Geomorphology 109: 236–245.

Mallaun, M. (2001) Verlauf der Primärsukzession in einem zentralalpinen Gletschervorfeld (Ötztaler Alpen, Tirol). Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Matthews, J. (1992) The ecology of recently-deglaciated terrain: a geoecological approach to glacier forelands and primary succession. Cambridge University Press, Cambridge.

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Mückenhausen (1993) Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. 4. Auflage. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.

Nestroy, O., Danneberg, O.H., Englisch, M., Geßl, A., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W. & Wagner, J. (2000) Systematische Gliederung der Böden Österreichs (Österreichische Bodensystematik 2000). Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges. 60: 1-99.

Neuwinger, I. (1987) Bodenökologische Untersuchungen im Gebiet Obergurgler Zirbenwald - Hohe Mut. In: MaB - Projekt Obergurgl, Patzelt G. (ed) Veröff. d. österr. MaB-Programms 10, Innsbruck, 173-190.

Neuwinger, I. & Czell, A. (1959) Standortsuntersuchungen in subalpinen Aufforstungsgebieten. I. Teil: Böden in den Tiroler Zentralalpen. Forstwiss. Centralblatt 78: 327-372.

Nicol, G.W., Tscherko, D., Embley T.M. & Prosser, J.I. (2005) Primary succession of soil *Crenarchaeota* across a receding glacier foreland. Environ. Microbiol. 7: 337-347.

Nicol, G.W., Tscherko, D., Chang, L., Hammesfahr, U. & Prosser, J.I. (2006) Crenarchaeal community assembly and microdiversity in developing soils at two sites associated with deglaciation. Environ. Microbiol. 8, 1382-1393.

Niederfriniger Schlag, R. & Erschbamer, B. (2000) Germination and establishment of seedlings on a glacier foreland in the Central Alps, Austria. AAAR 32: 270-277.

Patzelt, G. & Bortenschlager, S. (1979) Spät- und nacheiszeitliche Gletscher- und Vegetationsentwicklung im Inneren Ötztal. In: Patzelt G. (ed) Gletscherkundliche Forschungen in den Ostalpen und im Großen Pamir. Universität Innsbruck, Innsbruck, 78-89.

Raffl, C. (1999) Vegetationsgradienten und Sukzessionsmuster in einem zentralalpinen Gletschervorfeld (Ötztaler Alpen, Tirol). Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Reisigl, H. (1987) Die Untersuchung der alpinen Grasheide im Rahmen der Klimaxvegetation des Gurglertales (Ötztaler Alpen). In: MaB - Projekt Obergurgl, Patzelt G. (ed) Veröff. d. österr. MaB-Programms 10, Innsbruck, 191-203.

Rudolph, D. (1991) Vergleichende Studien zur Vegetationsentwicklung im Vorfeld des Rotmoosferners/Ötztaler Alpen. Diplomarbeit, Universität Gießen.

Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1998) Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Schlagintweit, H. & Schlagintweit, A. (1850) Untersuchungen über die physicalische Geographie der Alpen in ihren Beziehungen zu den Phänomenen der Gletscher, zur Geologie, Meteorologie und Pflanzengeographie. Verlag J. A. Barth, Leipzig.

Schmidegg, O. (1932) Geologische Spezialkarte der Republik Österreich 1:75.000,

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Blatt Sölden und St. Leonhard. Geologische Bundesanstalt Wien.

Schmidt, S.K., Reed, S.C., Nemergut, D.R., Grandy, A.S., Cleveland, C.C., Weintraub, M.N., Hill, A.W., Costello, E.K., Meyer, A.F., Neff, J.C. & Martin, A.M. (2008) The earliest stages of ecosystem succession in high-elevation (5000 metres above sea level), recently deglaciated soils. Proc. R. Soc. B 275: 2793-2802.

Schwienbacher, E. (2004) Populationsbiologische Studien an frühen Sukzessionsarten im Gletschervorfeld des Rotmoosferners (Ötztal, Tirol). Verbreitung und Standortsansprüche von *Artemisia genipi* und *A. mutellina*, Populationsstruktur von *A. genipi*. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Sitte, P., Weiler, E., Kadereit, J., Bresinsky, A. & Körner, C. (2002) Strasburger - Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.

Starnberger, R. (2006) Der Biosphärenpark Gurgler Kamm - Vegetation, Böden und Standortsfaktoren. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Stevens, P.R. & Walker, T.W. (1970) The chronosequence concept and soil formation. Q. Rev. Biol. 45: 333-350.

Strauss, S.L., Ruhland, C.T. & Day, T.A. (2009) Trends in soil characteristics along a recently deglaciated foreland on Anvers Island, Antarctic Peninsula. Polar Biol. 32: 1779-1788.

Tscherko, D., Rustemeier, T.R.A., Wanek, W. & Kandeler, E. (2003) Functional diversity of the soil microflora in primary succession across two glacier forelands in the Central Alps. Eur. J. Soil Sci. 54: 685-696.

Tscherko, D., Hammesfahr, U., Marx, M.C. & Kandeler, E. (2004) Shifts in rhizosphere microbial communities and enzyme activity of *Poa alpina* across an alpine chronosequence. Soil Biol. Biochem. 36: 1685-1698.

Tscherko, D., Hammesfahr, U., Zeltner, G., Kandeler, E. & Böcker, R. (2005) Plant succession and rhizosphere microbial communities in a recently deglaciated alpine terrain. Basic Appl. Ecol. 6: 367-383.

Veit, H. (2002) Die Alpen - Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Wallinger, M. (1999) Die Emergenz von Ephemeropteren, Plekopteren und Trichopteren in zwei Hochgebirgsbächen (Rotmoosache, Königsbach) im Raum Obergurgl, Tirol. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.

Wiedemann, T. (1991) Die Entwicklung von Boden und Vegetation im Vorfeld des Gaißbergferners, Ötztaler Alpen. Diplomarbeit, Universität Gießen.

© Alpine Forschungsstelle Obergurgl; download https://www.uibk.ac.at/afo/publikationen/copy_of_index.html.de und www.zobodat.at

Verzeichnis der AutorInnen

Erich Schwienbacher
Universität Innsbruck
Institut für Botanik
Sternwartestr. 15, 6020 Innsbruck, Österreich
Erich.Schwienbacher@uibk.ac.at

Eva-Maria Koch
Universität Innsbruck
Alpine Forschungsstelle Obergurgl
Gaisbergweg 3, 6456 Obergurgl, Österreich
Eva-Maria.Koch@uibk.ac.at

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Publikationen Alpine Forschungsstelle Obergurgl

Jahr/Year: 2010

Band/Volume: 1

Autor(en)/Author(s): Schwienbacher Erich, Koch Eva-Maria

Artikel/Article: Kapitel 5: Die Böden eines alpinen Gletschertales 93-119