

Das Hochtortor, ein internationales Forschungsgebiet für biologische Bodenkrusten und weiterführende Untersuchungen

Von Thomas PEER, Franz NEUBAUER & Gertrude FRIEDL

Zusammenfassung

Die Arbeit gibt eine Übersicht über die Bildung von biologischen Bodenkrusten am Hochtortor. Anhand von sog. „Behandlungsflächen“, in denen der Oberboden vollständig entfernt wurde, werden die verschiedenen Stadien der Boden- und Krustenentwicklung dargestellt und wird auf die besonderen Leistungen der Mikroorganismen hingewiesen. Ein besonderes Augenmerk gilt dem atmosphärischen Staub, der als Nährstoffträger nicht nur biologische Prozesse beschleunigt, sondern dessen Silikatanteile auch für das Vorkommen von Silikatpflanzen in der Karstlandschaft verantwortlich sind. Saharastaub wurde als weniger bedeutend erkannt, viel mehr sind es lokale Gesteinsaufschlüsse und Gletschervorfelder, die den Staub zusammensetzen. Eine Ausnahme stellen die sphärischen Mikrometeorite und Tektite extraterrestrischen Ursprungs dar.

Abstract

The paper outlines the development of biological soil crusts at the Hochtortor. The use of so-called „treatment plots“, in which the topsoil has been completely removed, illustrates the different stages of soil and crust development, and points out the special achievements of microorganisms. Special attention is paid to atmospheric dust, which not only accelerates the biological process as a nutrient carrier, but its silicate composition also leads to the emergence of silicate plants in karst landforms. The discovery of Sahara dust is considered less important. It is more dust composed of local rock outcrops and glacial foreland. Spherical micrometeorites and tektites of extraterrestrial origin are an exception.

Einleitung

Das Hochtortor ist ein hochalpiner Passübergang, der bereits in der Bronzezeit von Jägern überquert wurde. Später haben ihn Kelten und Römer als Handelsweg benützt, wie zahlreiche Funde wie Werkzeuge, Waffen, Statuen und Münzen, die am „Passheiligtum“ als Opfergaben gespendet wurden, belegen. Die reichen Mineral-, Gold- und Silbervorkommen haben ab dem 14. Jahrhundert bis in die frühe Neuzeit zu einer intensiven Bergbautätigkeit geführt. Die Schürfgelände gehören zu den höchsten in den Alpen und liegen durchwegs zwischen 2.500 und 3.000 m Seehöhe (HÜTTER 2014, KANDUTSCH 2015).

Das Hochtortor ist Ausgangspunkt für den „Klagenfurter Jubiläumsweg“, einen Grenzweg zwischen dem Land Salzburg und dem Land Kärnten, der über den Hocharn (3.254 m) bis zum Hohen Sonnblick (3.106 m) führt. Am Beginn des Weges erstreckt sich ein weitläufiges und für die Hohen Tauern einzigartiges Karstgebiet, das in den Arbeiten von FINK (1984) und im Naturkundlichen Führer „Geo-Trail Tauernfenster“ (EDER et al. 2000) ausführlich beschrieben ist (siehe auch PEER et

Schlüsselwörter

Biologische Bodenkrusten, Bodenbildung, Pflanzenentwicklung, Mineralstaub, Hochtortor, Hohe Tauern, Österreich

Keywords

Biological soil crusts, soil formation, plant succession, mineral dust, Hochtortor, Hohe Tauern, Austria

al. 2011). Der Untergrund besteht aus Triasgesteinen, die der sog. Seidlwinkeltrias angehören, und umfasst Dolomitmarmor, Kalkmarmor und Rauhwalcke, ein poröses Gestein, das durch die Auslaugung von Gips entstanden ist und sehr fein verwittert. Daraus haben sich sandige Rendzinaaböden mit einer ausgeprägten dunkel gefärbten biologischen Kruste entwickelt. Diese „Biokruste“ ist das wirklich Spektakuläre in diesem Gebiet. Sie beherbergt einen Mikrokosmos, in dem Bodenorganismen wie autotrophe Cyanobakterien, heterotrophe Bakterien, Bodenalgae, Mikropilze, Moosrhizoide und Flechtenhyphen ineinander verwoben sind und dadurch oberflächliche mineralische Bodenpartikel verbinden und stabilisieren (BELNAP 2003, BELNAP & LANGE 2003, BÜDEL 2005, BELNAP & BÜDEL 2016). Biologische Bodenkrusten kommen hauptsächlich in den vegetationsarmen ariden und semiariden Gebieten vor und tragen zum biogeochemischen Nährstoffzyklus bei, indem sie atmosphärischen Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) binden. Am Hochtor leisten die Biokrusten Ähnliches, wie dies im Projekt „Soil Crust International (SCIN)“ im Rahmen des pan-Europäischen Forschungsnetzwerkes zur Artenvielfalt „BiodivERsA“, untersucht wurde (BÜDEL et al. 2014). In diesem Projekt, das 2012 begonnen wurde, wurden neben pflanzenphysiologischen Daten auch Klima- und Bodendaten gewonnen, und es wurde ein umfangreiches Arteninventar sowohl der autotrophen als auch der heterotrophen Organismen erstellt, das dann mit dem der anderen Untersuchungsgebiete in Deutschland, Schweden und Spanien verglichen wurde. Zahlreiche Publikationen wie jene von PEER et al. (2010, 2011), ZHENG et al. (2014), WILLIAMS et al. (2016, 2017) und JUNG et al. (2018) belegen die herausragende Stellung des alpinen Standortes Hochtor für die internationale Krustenforschung. Cyanobakterien fungieren als Erstbesiedler neuer oder gestörter Habitate; sie schließen sich mit anderen Mikroorganismen zu Biokrusten (Biofilme) zusammen und bilden die Vorstufe für eine erste Bodenbildung (NEMERGUT et al. 2007, BREEN & LÉVESQUE 2008, SCHMIDT et al. 2008, CICCAGO et al. 2016, RIME et al. 2016). Die Krusten scheinen zunächst einen in sich abgeschlossenen Organismus zu bilden und erst mit der Zeit wandern aufsitzende Krustenflechten und Gefäßpflanzen ein, die in einem wechselseitigen physischen und chemischen Wettbewerb stehen. Dadurch verändert sich das Verhältnis zwischen Bodenkrusten, Flechten und Pflanzen sowohl räumlich als auch zeitlich immer wieder (BELNAP et al. 2003, ARMSTRONG & WELCH 2007, ZHANG et al. 2016). Eine wichtige Rolle für die Besiedelung neuer Habitate spielt Lufttransportierter Mineralstaub, der durch Nährstoff- und Humuszufuhr sowie durch Mikroben, die an den Staub gebunden sind, entscheidend in die Biogeozönose eingreift (RAVI et al. 2011, MEOLA et al. 2015, MAKI et al. 2019). Nachfolgend werden folgende Fragen behandelt:

1. Wie verläuft die biologische Sukzession nach gänzlicher Bodenentfernung?
2. Wie erfolgt die Besiedlung mit höheren Pflanzen in den gestörten Flächen?
3. Welche Rolle spielt atmosphärischer Staubeintrag sowohl für die Bodenbildung als auch für die Pflanzenbesiedlung und -zusammensetzung?



Abb. 1a: Untersuchungsgebiet im Plattenkar. Maßstab: 1:75.000
Quelle: SAGIS
<https://www.salzburg.gv.at/sagis>

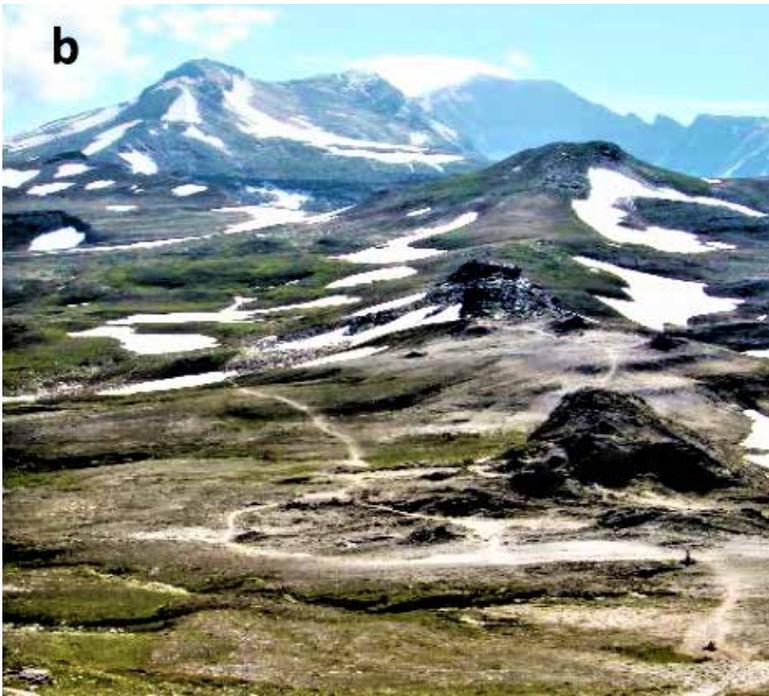


Abb. 1b: Klagenfurter Jubiläumsweg Richtung Osten. Foto: T. Peer

Geländebeschreibung und Methodik

Das Untersuchungsgebiet befindet sich östlich des Hochtorns, dem höchsten Punkt der Großglockner Hochalpenstraße, in einer Höhe von 2.505 m (Abb. 1a und 1b). Das weitläufige Karstplateau ($47^{\circ}05'09''$ bis $47^{\circ}04'55''$ N und $12^{\circ}50'44''$ bis $12^{\circ}50'52''$ E) schließt das sog. „Plattenkar“ ein, eine durch Gletschereis und dessen Geschiebe ausgeformte Mulde, in der sich durch physikalische Gesteinsverwitterung mehr oder weniger lose Platten gebildet haben. Im Westen überlagern Bündner Schiefer der Brennkogel-Fazies die Triasgesteine. Im Osten erheben sich

Abb. 2: Rendzic Regosol aus Rauwacke mit biologischer Bodenkruste und Humuseinwaschung. Foto: T. Peer



Rossköpfel und Rossschartenkopf als Reste der Brennkogel-Fazies, bestehend aus Phylliten, Glimmerschiefern und Quarziten (CORNELIUS & CLAR 1939, EXNER 1964, FRANK 1969). Das Klima ist hochalpin. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 1,5 °C, und die Jahresniederschläge liegen zwischen 1.750 und 2.000 mm, wobei an 270 bis 300 Tagen die Böden schneebedeckt sind. Am Grat zwischen der Nord- und Südseite des Alpenhauptkammes toben fast immer heftige Winde (AUER et al. 2002). In dieser unwirtlichen Gegend wurde im Jahr 2012 ein geeignetes Areal ausgewählt und wurden 10 unbehandelte (= Kontrollflächen) und 10 behandelte (= bis zum Grund abgeschälte Flächen) mit je 1 m² Größe angelegt. Aus diesen Flächen wurden in der Folge (2012, 2014, 2020) Bodenproben entnommen und in den Labors der ehemaligen Botanik (Universität Salzburg) chemisch-physikalisch mit konventionellen Methoden untersucht (ZHENG et al. 2014). Zudem wurde die Entwicklung der Biokrusten (optisch) verfolgt und wurden die Individuenzahlen und Deckungsgrade der Gefäßpflanzen regelmäßig kontrolliert. Die aufwändigen mikrobiellen Analysen können hier nicht wiedergegeben werden. Die statistische Datenanalyse wurde mit Microsoft Excel 1.0 durchgeführt. Die Arbeit ist eine Vorarbeit der noch nicht eingereichten Gemeinschaftsarbeit „Mineralogical composition and origin of airborne dust in an alpine environment: effects on soil formation and plant growth“. Autoren: Thomas Peer, Franz Neubauer, Gertrude Friedl, Ling-Juan Zheng und Anne Kasper-Giebl.



Ergebnisse

Die Untersuchungen am Hochtorn haben gezeigt, dass sich bereits nach 2 Jahren ein dünner, heller Biofilm auf dem nackten Boden der Behandlungsflächen ausgebildet hat. Dieser ist im Verlauf der nächsten 6 Jahre deutlich dunkler geworden, aufgrund einer höheren Dichte an Bakterien, vor allem Cyanobakterien mit Arten der Gattungen *Microcoleus*, *Chroococcus*, *Gloeocapsa* and *Nostoc*. Durch ihre Photosynthese, N- und C-Bindung sowie biologisch-chemische Gesteinsverwitterung werden die physikochemischen Eigenschaften degradiertes und neuer Böden verbessert (LIAN et al. 2008, SCHMIDT et al. 2008). Anhand verschiedener Gradienten an exponierten und geschützten Stellen des Hochtorns konnte gezeigt werden, wie zunächst bakterielle Filamente, Algen- und Pilzfäden sowie Humuseinwaschung die skelettreichen Rohböden im Gratbereich oberflächlich verfestigt haben (HUBER et al. 2007). An Stellen mit längerer Entwicklungszeit haben sich humusreiche Rendsina-Lockerböden (Rendzic Regosols) gebildet, mit einem ausgeprägten A-Horizont und einer dunklen, relativ festen Kruste (Abb. 2). Die Frostdynamik in diesen Höhen wird durch Frosthebungen und Risse in den Krusten, die mit Sand und Kies ausgefüllt sind, deutlich (Abb. 3). Die dunkle Farbe ist durch UV-schützende Pigmente in den Cyanobakterien und in anderen Krustenorganismen entstanden. Dadurch wird die Albedo reduziert und die Temperatur an der Oberfläche der Kruste erhöht sich, was die Keimungsbedingungen verbessert. Die physikochemischen

Abb. 3: Biologische Bodenkruste mit Frosthebungen, rauer Oberfläche und mit Kies und Sand gefüllten Rissen, denen vereinzelt Pflanzen folgen.

Foto: T. Peer

	Behandlung	pH	EC	TOC	TN	verfüg. P
			$\mu\text{S/cm}$	%	%	
2012	nackter Boden	7,36 \pm 0,06	88 \pm 9,89	0,76 \pm 0,31	0,06 \pm 0,03	1,62 \pm 1,03
2014	Neue Kruste	7,39 \pm 0,03	124,36 \pm 10,3	1,34 \pm 0,51	0,15 \pm 0,05	1,85 \pm 0,42
2020	Neue Kruste	7,44 \pm 0,05	94 \pm 7,96	3,48 \pm 1,48	0,2 \pm 0,09	5,4 \pm 1,81

Kontrolle

2014	Oberboden	7,32 \pm 0,03	169,28 \pm 34,11	4,28 \pm 5,22	0,18 \pm 0,14	10,15 \pm 8,21
2014	Unterboden	7,41 \pm 0,04	87,9 \pm 15,54	1,20 \pm 1,44	0,08 \pm 0,04	5,48 \pm 6,74
2020	Oberboden	7,47 \pm 0,03	96,5 \pm 2,12	3,7 \pm 0	0,2 \pm 0,01	16 \pm 0,01

2020	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg
	EDTA, mg/kg					
Behandlung	228,8 \pm 66,24	484,8 \pm 448,26	1,5 \pm 0,5	3,46 \pm 1,35	9,48 \pm 4,95	2,98 \pm 1,47
Kontrolle	200,5 \pm 16,26	305,5 \pm 81,31	2 \pm 0,42	9,15 \pm 2,75	7,87 \pm 0,36	2,49 \pm 0,02

Tab. 1:
Bodenparameter
(Mittelwerte und
SD) der Behand-
lungs- und Kontroll-
flächen (2012–2020).

Unterschiede zwischen den Behandlungsflächen im Zeitintervall von 2012 bis 2020 und den reifen Rendzina-Lockerböden sind in Tab. 1 dargestellt. Im Jahresvergleich fällt die enorme Steigerung in den Humus-, Stickstoff- Phosphor- und Kaligehalten auf. Die Bodenart entspricht einem sandigen Lehm bzw. lehmigen Sand mit nur geringem Tonanteil. Entsprechend niedrig ist die Austauschkapazität (CEC), wobei Ca mit 74,6 % und Mg mit 23,5 % die höchsten Anteile aufweisen. Der pH-Wert liegt über 7, wodurch viele Elemente wie Eisen, Mangan, Kupfer und Zink schlecht verfügbar sind. In den Kontrollböden sind die Humus- und die Nährstoffgehalte (N, P, K) im Oberboden z. T. deutlich höher und auch höher als im Unterboden. Auf den Biokrusten haben sich bereits nach 2 Jahren erste Pflanzen angesiedelt. Sie sind durchwegs klein (1–4 cm) und wachsen meistens vegetativ, bis auf einige wenige, wie *Braya alpina*, die regelmäßig blüht. Zu den häufigsten Pflanzen gehören außer *Braya alpina* (endemisch in den Ostalpen), *Minuaria gerardii*, *Saxifraga oppositifolia*, *Salix herbacea*, *Persicaria vivipara*, *Ranunculus alpestris*, *Sesleria ovata*, *Silene acaulis* und einige andere Arten, die nicht regelmäßig in den Versuchsflächen vorkommen. Insgesamt wurden 9 bis 13 Arten, verteilt auf 10 Probeflächen, gezählt. Der Deckungsgrad beträgt in allen Jahren nicht mehr als 1 %, da die meisten Pflanzen einzeln, und nur selten in Gruppen (z. B. *Silene acaulis*) wachsen. Sie folgen mit ihren Wurzeln häufig den mit Schutt und Feinmaterial gefüllten Spalten und Rinnen, die die Krusten durchziehen. Andere Arten dringen mit ihren langen Ausläufern von den Rändern ein wie *Saxifraga oppositifolia* oder es handelt sich um kriechende Spalierpflanzen wie

verfüg. K	verfüg. Ca	verfüg. Mg	Sand	Schluff	Ton	Textur
mg/kg			%			
6,96±2,9	1696,7±849,33	278±179,96	56,98±5,05	41,36	2,3±1,13	sL
10,69±5,12	1763,5±827,44	261,5±91,99	58,69±7,08	39,01	3,07±0,89	sL
24,6±7,50	1897,2±991,77	261,2±22,89	75,26±5,34	21,54	3,22±0,58	IS

28,88±13,38	1950,4±353,38	344,5±12,47	57,97±5,95	34,04	2,56±1,48	sL
8,15±6,15	2049,3±511,44	341,2±85,86	58,86±7,08	31,81	3,52±3,49	sL
42,5±6,36	1574±73,53	231,5±9,18	76±12,3	21,25	2,85±0,35	IS

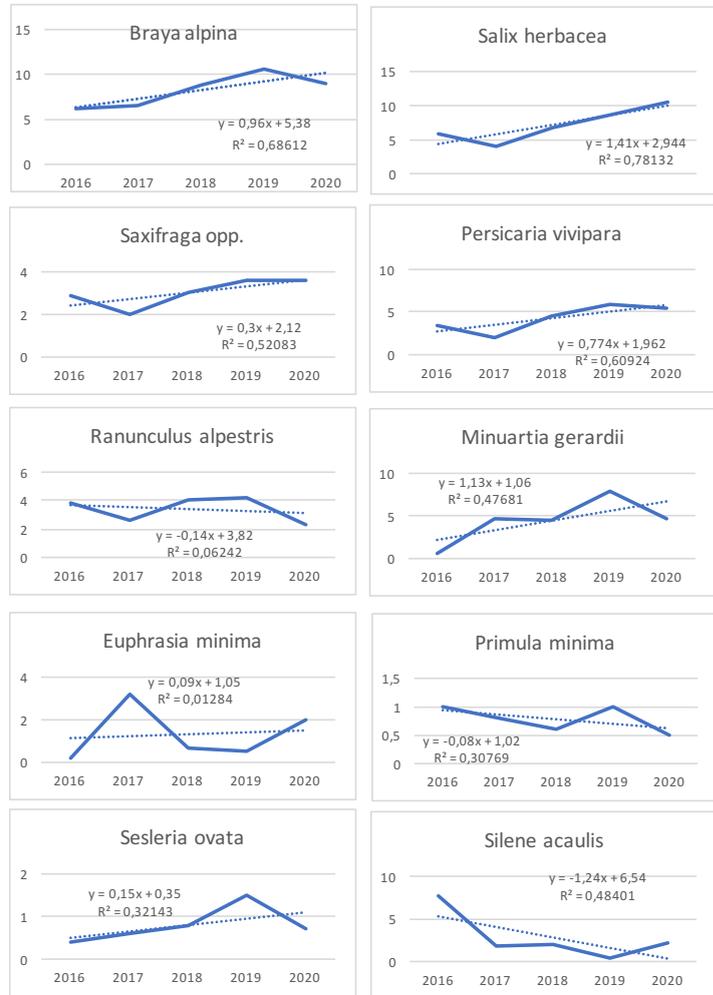
K	Al	Fe	Mn	CEC
cmolc/kg				
<20	0,06	0,06±0,01	<0,01	12,67±6,41
<20	0,06	0,045±0,0	<0,01	10,85±0,38

	2016	2017	2018	2019	2020	Steigung	R2	Pearson
<i>Braya alpina</i>	6,2	6,6	9,1	12,1	9	1,112	0,5475	0,739
<i>Salix herbacea</i>	5,8	4	6,87	10,14	10,71	1,596	0,7763	0,881
<i>Saxifraga opp.</i>	2,9	2	3	3,8	3,6	0,32	0,5141	0,717
<i>Persicaria viv.</i>	3,5	2	4,75	6,14	5,42	0,798	0,5922	0,769
<i>Ranunculus alp.</i>	3,8	2,6	3,55	3,25	2,28	-0,239	0,3489	-0,59
<i>Minuartia gerardii</i>	0,6	4,6	4,55	8,12	4,5	1,132	0,4524	0,676
<i>Euphrasia minima</i>	0,2	3,2	0,7	0,5	1,5	-0,01	0,0002	-0,013
<i>Primula minima</i>	1	0,8	0,6	1	0,5	-0,08	0,3077	-0,556
<i>Sesleria ovata</i>	0,4	0,6	0,8	1,5	0,7	0,155	0,3101	0,556
<i>Silene acaulis</i>	0	4	0	1	0	-1,27	0,7491	-0,865

Tab. 2a: Häufige Pflanzenarten, mittlere Individuenzahl (2016–2020), Steigungsgrad, Bestimmtheitsmaß (R2) und r Pearson-Koeffizient.

Salix herbacea oder *Dryas octopetala*. Kalkpflanzen sind mit 46,7 % am häufigsten vertreten, gefolgt von intermediären Pflanzen mit 33,3 % und Silikatpflanzen mit 20 % (z. B. *Primula minima*, *Euphrasia minima*, *Salix herbacea*). Die Individuenzahl erhöhte sich im Laufe der Jahre nur wenig, mit Ausnahme von *Salix herbacea* (Tab. 2a). Ergänzend veranschaulichen Grafiken in Tab. 2b die Entwicklung einzelner Arten.

Tab. 2b: Häufige Pflanzenarten, Individuenzahl (y-Achse), Beobachtungsjahre (x-Achse, 2016–2020), Steigungsgrad (y) und Bestimmtheitsmaß (R²).



Eine größere Anzahl von Flechten konnte erst 2020 durch Roman Türk (Universität Salzburg) entdeckt werden, Moose hingegen fehlen bis heute. Im Vergleich zu den Behandlungsflächen weisen die Kontrollflächen 19 bis 22 Arten auf, die ca. 25 % der Fläche bedecken. Flechten bedecken 20 % bis 30 % und Moose weniger als 10 %. Biologische Bodenkrusten nehmen hingegen oft über 50 % ein (Abb. 4).

Mineralstaubbmessungen ergaben am Hochtors-Süd 253 kg/ha/a und an der Edelweißspitze 1.415 kg/ha/a. Höhere Werte wurden mit dem Deflameter (aktiver Staubsammler) erzielt: 1.376 kg/ha/a am Hochtors-Süd und 1.259 kg/ha/a am Hochtors-Nord (GRUBER 1980). In der mineralischen Zusammensetzung dominieren Muskovit, Dolomit, Feldspat, Quarz, Calcit, Chlorit und Talk. Außerdem wurden große Mengen an Kalkspat (CaCO₃) festgestellt. Die jährlichen Ablagerungen wurden mit 0,01 mm bis 1,45 mm berechnet. Luftmessungen am Sonnblick-Observatorium (2013 bis 2019) verzeichneten an zwischen 21 und



Abb. 4: Ausgedehnte dunkle biologische Bodenkrustenfläche mit Polsterpflanzen und einzelnen Gras/Seggen-Horsten.
Foto: T. Peer

29 Tagen Staubeinfluss. Die höchsten Massekonzentrationen wurden 2015 mit $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und 2016 mit $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht. Im Mittel waren es weniger als $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Jahr der Probennahme am Hochtor (2014), kam es an 24 Tagen im Frühling und im Herbst zu Staubereignissen, die 5 bis 24 Stunden pro Tag andauerten. Die höchste Massenkonzentration wurde mit $39,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am 4. April erreicht (Schauer, pers. Mitteilung). Mögliche Staubquellen sind lokale/regionale Felsaufschlüsse, eisfrei gewordene Gletschervorfelder und die Wüsten Nordafrikas (Saharastaub). Von dort werden jährlich an die 500 Mio. Tonnen Staub durch thermische Turbulenzen in die obere Atmosphäre aufgeweht und über viele Kilometer nach Norden transportiert (Abb. 5). Während des Transports verändern

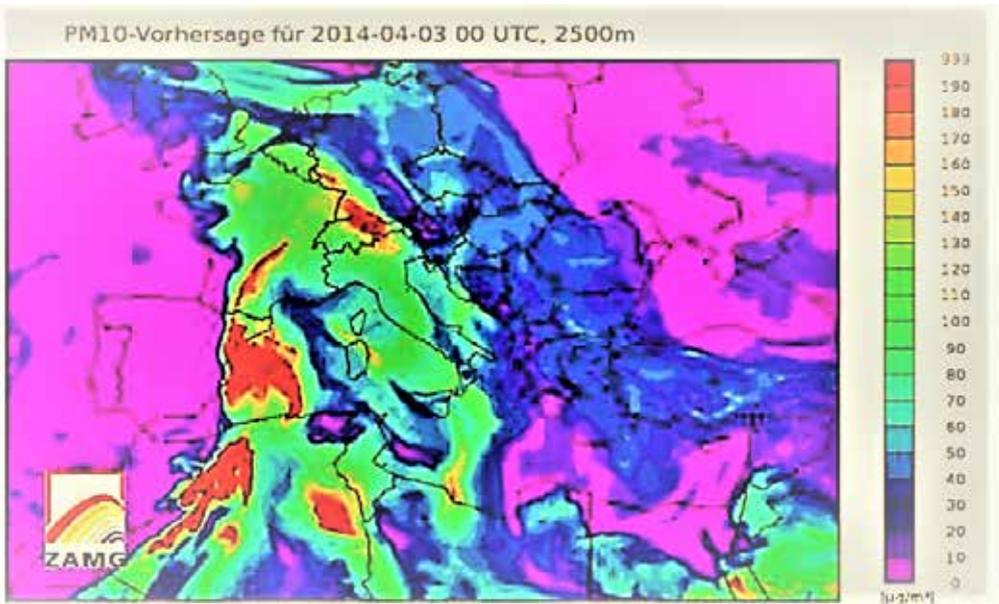


Abb. 5: Die starke Südströmung bringt auch Sahara-Staub nach Österreich, der den Himmel leicht trüben kann. Am Sonnblick-Observatorium der ZAMG werden bereits erhöhte Staubkonzentrationen mit Partikeln von weniger als 10 Mikrometer (μm) gemessen (PM10). Foto: ZAMG

sich die Staubteilchen, werden kleiner, beladen sich mit Mikroben und partikulärem organischem Kohlenstoff, verändern ihren Chemismus und vermischen sich mit aufgewirbelten lokalen Staubteilchen. Einmal abgelagert, ist eine genaue Herkunftsbestimmung oft schwierig (GRIFFIN et al. 2001, MUHS et al. 2014). Das heißt, es ist nicht alles Sahara-Staub, was in den Alpen herunterkommt, wie dies oft behauptet wird. Aktuelle Daten zum Sahara-Staub in Österreich sind unter <https://www.zamg.ac.at/> abrufbar. Die rötliche Farbe im Schnee weist auf eisenreiche Bestandteile hin bzw. können es auch einzellige Grünalgen (*Chlamydomonas nivalis*) mit einem orange, rosa bis dunkelrot gefärbtes Zytoplasma sein, wie dies durch Frau Dr. Ulrike Gartner (Universität Salzburg) mikroskopisch nachgewiesen wurde (HOHAM & REMIAS 2020).

In den rasterelektronenmikroskopischen Analysen fanden sich Quarze, Muskovite, Amphibole, Dolomite, Calcite, Anorthite, Eisenoxide und einige Tonminerale, die wahrscheinlich alle lokalen Ursprungs sind. Außerdem seltene vulkanische „Phänokristalle“ (mit geätzter Oberfläche) und sehr seltene kugelförmige Mikrotektite und Mikrometeorite, letztere (möglicherweise) kosmischen Ursprungs. Tektite (von griechisch „tektos“, geschmolzen) sind Glasobjekte, deren Bildung durch den Einschlag großer Meteorite auf der Erdoberfläche verursacht wird. Dabei wird Gesteinsmaterial geschmolzen und über hunderte Kilometer fortgeschleudert, wobei es zu Glas erstarrt (GLASS 1990). Bei den „echten“ Mikrometeoriten handelt es sich um interplanetaren (kosmischen) Staub, von dem jährlich ca. 40.000 Tonnen auf die Erde fällt (FOLCO & CORDIER 2015). Während des Fluges durch die Erdatmosphäre erhitzen sich die Teilchen, wobei sie aufschmelzen und bei der anschließenden schnellen Abkühlung eine sphärische Form annehmen können (Abb. 6). Je nach Dauer dieser Vorgänge kommt es zu chemisch-mineralogischen Veränderungen und zu unterschiedlichen Gruppierungen (GENGE et al. 2008).

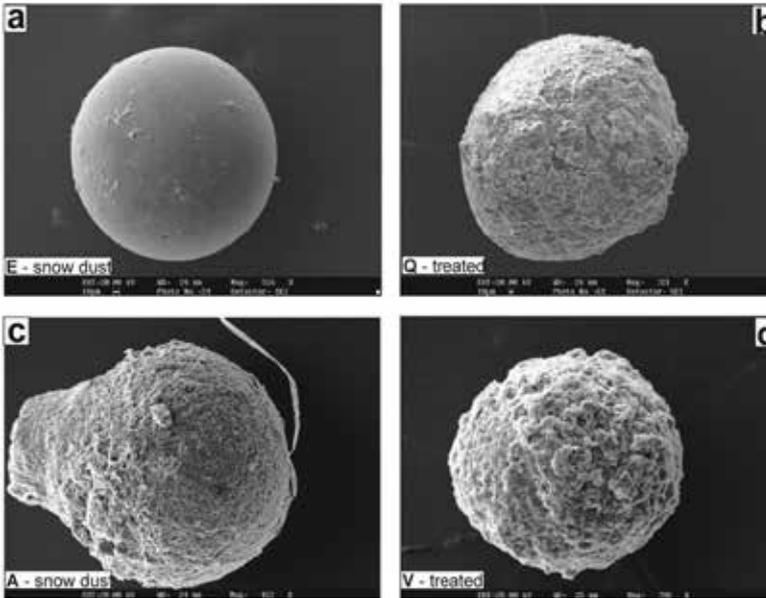


Abb. 6: Glatte und krustige sphärische Gebilde, wahrscheinlich Mikrometeorite (a) bzw. Tektite (b, c, d). Die Proben wurden im Schnee bzw. in den Behandlungsfächen gefunden. Ihr Durchmesser beträgt ca. 300 µm. Fotos: G. Friedl

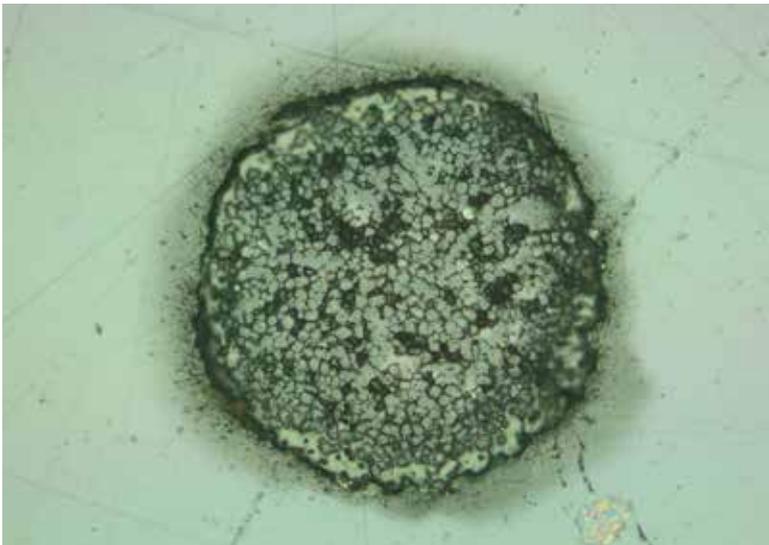


Abb. 7: Auflichtfoto durch einen Querschnitt einer Mikrosphäre. Auffällig ist die granulare Struktur im Inneren der Mikrosphäre, die aus verschiedenen, aber stets kohlenstoffreichen Materialien besteht. Neben Kohlenstoff sind Fe, Al, Mn, Ni und Ca häufige Elemente in der feinstkörnigen, granularen Matrix. Foto: F. Neubauer

Die Größe der Teilchen schwankt zwischen einigen hundert Mikrometern und einigen Millimetern. Nach aktuellen Analysen am Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz handelt es sich beim Staub am Hochtors um eisenreiche (wahrscheinlich) kosmische Mikrosphären mit zahlreichen eingeschlossenen Mikrokügelchen (Abb. 7), deren Entstehung noch vollkommen ungeklärt ist. Es sei hier erwähnt, dass es auch menschengemachte Staubpartikel gibt, die den Mikrometeoriten recht ähnlich sehen. Letztere entstehen durch vielfältige industrielle Prozesse, z. B. durch Flex-, Schweiß- oder andere Bauarbeiten mit Metall. Auch Flugasche enthält Mikrosphären. Andererseits ist interessant, dass

Hobbyforscher auf Hausdächern schon hunderte, sogar tausende Teilchen gefunden haben, die als extraterrestrisch bestätigt wurden. Daraus hat sich am Berliner Naturkundemuseum das „Citizen-Science-Projekt“ entwickelt, bei dem Laien lernen, wie man den Sternenstaub unter dem Mikroskop aufspüren kann. Für die Umwelt und speziell für die Hochgebirgsregion hat dieser „Sternenstaub“ aber noch eine andere Bedeutung. So konnten in einigen Mineralien, inklusive Mikrometeorite, u. a. die Elemente Si, Fe, Mn, Al, P, Ca, Mg und Na nachgewiesen werden. Sie sind eine wichtige Ergänzung zur lokalen Gesteinsverwitterung, insbesondere im Kalkgebiet.

Diskussion

Es wird vermutet, dass die rasche Entwicklung der Biokrusten in den Behandlungsflächen auf zusätzliche Nährstoffzufuhr (vor allem Phosphor und Eisen) und auf Humusanteile im Staub zurückzuführen ist. Eine quantitative Bestimmung der Staubmengen in den Behandlungsflächen war nicht möglich, doch weisen die mineralogischen Ergebnisse auf Staubablagerungen hin. Die äolisch eingebrachten Nährstoffe dürften das Wachstum der Mikroorganismen fördern und Humus dürfte den C-Gehalt beeinflussen, der den Zellmetabolismus während der Atmung, Photosynthese und Stickstofffixierung anregt (INSAM 1996, EVANS & JOHANSEN 1999). Als weitere Ursache für die rasche Krustenentwicklung am Hochtor werden die ganzjährige hohe Luftfeuchtigkeit und der feinkörnige Untergrund diskutiert (ROZENSTEIN et al. 2014). Wie Messungen der Photosynthese in Krusten belegen, sind die Mikroorganismen trotz der langen Schneebedeckung ganzjährig aktiv (BÜDEL et al. 2014, WEBER et al. 2016, WILLIAMS et al. 2017), weshalb die Krusten eine beachtliche Dicke von 2–3 cm erreichen. Zusätzlich können von nah oder fern transportierte Diasporen und Bakterien die Krustenbildung positiv beeinflussen bzw. neue Bodenkrusten generieren (ROSSI et al. 2017, WARREN et al. 2018). In arktischen/alpinen Gebieten dauert es meist mehr als 10 Jahre (NEMERGUT et al. 2007, BREEN & LÉVESQUE 2008, SCHMIDT et al. 2008), und in ariden und semiariden Gebieten mehrere Jahrzehnte, bis sich eine vollständige Kruste entwickelt hat. Kälte, Schneearmut und geringe Feuchtigkeit hemmen die Neusynthese von Zellbestandteilen, da die notwendige Energiegewinnung über den Stoffwechsel (Metabolismus) eingeschränkt ist (BELNAP 2003, WILLIAMS et al. 2012, DENG et al. 2020).

Weitere Untersuchungen belegen, dass atmosphärischer Staub auch den Bodenaufbau durch die Zufuhr von Mineralpartikeln beeinflusst (SUCHODOLETZ et al. 2013). So ist die Entwicklung von Braunlehmen (Cambisols) aus kompaktem Kalk und Dolomit mit einer spätglazialen allochthonen Staubzufuhr zu erklären. Die rötlichen „Chromic Cambisols“ im alpinen Karst der Nordalpen werden von BIERMAYER & REHFUESS (1985), KÜFMANN (2003, 2008a, 2008b) und DUFFY (2011) ebenfalls mit äolischer Staubzufuhr in Verbindung gebracht.

Obwohl sich erste Pflanzen bereits nach zwei Jahren in den Behandlungsflächen zeigten, vermehrten sie sich in den kommenden Jahren kaum, dies trotz guter Nährstoffversorgung. Eine der Ursachen sind starke Erosionen, denen die Behandlungsflächen jedes Jahr ausgesetzt sind, bzw. deuteten Tierspuren auf einen möglichen Verbiss hin. Eine

Ausnahme bildet die Kraut-Weide (*Salix herbacea*), die sich von Jahr zu Jahr stärker ausbreitet. Möglich ist dies durch ihre verholzten, unterirdischen Kriechtriebe (Erosionsschutz) und die Anpassung an die lange Schneebedeckung. Lediglich drei Monate sind für Blüte und Samenbildung erforderlich. Die Blüten werden vom Wind bestäubt, und die Samen bleiben im kalten Boden lange keimfähig.

Dass sich die Pflanzen in den Behandlungsflächen noch vor den Flechten entwickelt haben, hängt möglicherweise damit zusammen, dass Flechten gegenüber Störungen wie Auswaschung, Bodenverlagerung oder Frosthub anfälliger sind als Gefäßpflanzen. Allerdings, wenn sich Flechten einmal etabliert haben, kann es für die empfindlichen Hochgebirgspflanzen schwierig werden, sich zu behaupten. Insbesondere wenn die Biokrusten rasch wachsen und die Flechten sich stark ausbreiten, entstehen physische und chemische Konkurrenzbedingungen, wodurch die Pflanzen verdrängt werden und ihre Wurzeln zum Teil abreißen (FAVERO-LONGO & PIERVITTORI 2010). Nach wie vor wird diskutiert, ob sich biologische Bodenkrusten negativ oder positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken (BELNAP et al. 2003). Zusammenfassend lässt sich dazu sagen: „Obwohl Aufkommen, Überleben und Etablierung der Pflanzen durch die Krusten z. T. gehemmt werden, profitieren sie in der Folge vom Stickstoff, der Feuchtigkeit und der Wärme“ (LANGHANS et al. 2009).

Für das Vorkommen der auffällig vielen Silikatpflanzen am Hochtor könnte ebenfalls der Staub verantwortlich sein, da er Elemente wie Phosphor, Eisen, Silizium und Aluminium enthält, die im Kalk im Mangel sind. Auch im staubigen Schmelzwasser konnten geringe Mengen an Phosphor, Eisen und Aluminium nachgewiesen werden. Durch vergleichende Untersuchungen mit *Primula minima* und *Cerastium uniflorum*, zwei typische Silikatpflanzen, die sowohl in dem sauren Stubachtal (Rudolfshütte) als auch am Hochtor gesammelt wurden, konnte festgestellt werden, dass die Pflanzen auch am Hochtor ausreichend hohe Eisen- und Aluminiumkonzentrationen im Zellsaft enthielten, vor allem durch ihre Möglichkeit, 3-wertiges Eisen im Boden zu reduzieren und zu mobilisieren (REITBAUER 2010). Die hohen Ca- und Mg-Konzentrationen konnten andererseits gut mit Hilfe von Carboxygruppen komplexiert werden (KINZEL 1983). Die beiden Pflanzen wurden deshalb als calcitolerant und schwach siderophil (metallliebend), aber nicht streng acidophil klassifiziert. Weiters wird die Möglichkeit diskutiert, dass durch die VA-Mykorrhizierung und den interindividuellen Austausch von Pflanzensubstanzen Silikatpflanzen eine höhere Toleranz für Karbonatböden erhalten (LAPEYRIE 1990, BOTHE 2015, ADJOU-SADADOU & HALLI-HARGAS 2016).

Global gesehen, wächst das Interesse für natürlichen Staub, zum einen dadurch, dass durch die Nährstoffe in den Staubpartikeln die ausgelaugten Böden tropischer Regenwälder gedüngt werden (OKIN et al. 2004, RIZZOLO et al. 2016), zum anderen die Produktion von Phytoplankton in den Ozeanen erhöht wird (FRANCHY et al. 2013). Im Hochgebirge werden durch kalkhaltige und silikathaltige Stäube Mikrohabitate geschaffen, die die Pflanzendiversität durch calcicole und calcifuge Arten erhöhen (FARMER 1993, WOHLGEMUTH & GIGON 2003). Dieses Phänomen wurde am Hochtor bisher noch nicht untersucht.

LITERATUR

- ADJOU-D-SADADOU D. & HALLI-HARGAS R. (2016): Efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in promoting growth of seedlings of some calcifuge *Eucalyptus* species in a calcareous soil. – International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences, 4: 43–52, Tamil Nadu, India.
- ARMSTRONG R. A. & WELCH A. R. (2007): Competition in lichen communities. – Symbiosis, 43: 1–12, Dalhousie University Libraries, Halifax, Kanada.
- AUER I., BÖHM R., LEYMÜLLER M. & SCHÖNER W. (2002): Das Klima des Sonnblicks – Klimaatlas und Klimatopographie der GAW Station Sonnblick einschließlich der umgebenden Gebirgsregionen. – Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik 28. – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, 408 S.
- BELNAP J. (2003): The world at your feet: desert biological soil crusts. – Frontiers in Ecology and Environment, 1: 181–189, Ecological Society of America (ESA), Washington D.C.
- BELNAP J. & LANGE O. L. (Eds.) (2003): Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. – Ecological Studies, 150. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 506 S.
- BELNAP J., PRASSE R. & HARPER K. T. (2003): Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants: 281–300. In: BELNAP J. & LANGE O. L. (Eds.) (2003): Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. – Ecological Studies, 150. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 506 S.
- BELNAP J. & BÜDEL B. (2016): Biological soil crusts as soil stabilizers: 305–320. In: WEBER B., BÜDEL B. & BELNAP J. (Eds.) (2016): Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands. – Ecological Studies, 226. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 549 S.
- BIERMAYER G. & REHFUESS K. E. (1985): Holozäne Terrae fuscae aus Carbonatgesteinen in den Nördlichen Kalkalpen. – Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, 148: 405–416, Weinheim.
- BOTHE H. (2015): The lime-silicate question. – Soil Biology and Biochemistry, 89: 172–183, Academic press, Amsterdam.
- BREEN K. & LÉVESQUE E. (2008): The influence of Biological Soil Crusts on soil characteristics along a high arctic glacier foreland, Nunavut, Canada. – Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 40: 287–297, Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), University of Colorado.
- BÜDEL B. (2005): Microorganisms of Biological Crusts on Soil Surfaces: 307–323. In: VARMA A. & BUSCOT F. (Eds.) (2005): Microorganisms in soils: Roles in genesis and functions. – Soil Biology und Biochemistry. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 419 S.
- BÜDEL B., COLESIE C., ALLAN GREEN T. G., GRUBE M., LAZARO SUAU R., LOEWEN-SCHNEIDER K., MAIER S., PEER T., PINTADO A., RAGGIO R., RUPRECHT U., SANCHO L. G., SCHROETER S., TÜRK R., WEBE B., WEDIN W., WESTBERG M., WILLIAMS L. & ZHENG L. (2014): Improved appreciation of the functioning and importance of biological soil crust in Europe: The Soil Crust International Project (SCIN). – Biodiversity and Conservation, 23: 1639–1658, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- CICCAZZO S., ESPOSITO A., BORRUSO L. & BRUSETTI L. (2016): Microbial communities and primary succession in high altitude mountain environments. – Annals of Microbiology, 66: 43–60, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- CORNELIUS H. P. & CLAR E. (1939): Geologie des Grossglocknergebietes. – Abhandlungen der Zweigstelle Wien der Reichsstelle für Bodenforschung, Wien, 305 S.
- DENG S., ZHANG D., WANG G., ZHOU X., YE C., FU T., TAN K., YURUI Z., YONGDING L. & LANZHOU C. (2020): Biological soil crust succession in deserts through a 59-year-long case study in China: How induced biological soil crust strategy accelerates desertification reversal from decades to years. – Soil Biology and Biochemistry, 141: 107665, Elsevier, Amsterdam.

- DUFFY L. (2011): Mikroreliefbedingte Raummuster von Böden, äolischen Substraten und Flugstäuben im Hochgebirgskarst der Nördlichen Kalkalpen (Reiteralpe, Berchtesgadener Alpen). – Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München, 131 S.
- EDER P., MEMARAN M., WIESHAMMER G. & WINDING G. (2000): Naturkundlicher Führer – Geo-Traill Tauernfenster Bd. 18. Nationalpark Hohe Tauern. Innsbruck, 18 S.
- EXNER CH. (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Sonnblickgruppe. – Geologische Bundesanstalt Wien III. Wien, 170 S.
- EVANS R. & JOHANSEN J. (1999): Microbiotic crusts and ecosystem processes. – *Critical reviews in plant sciences*, 8: 183–225, Taylor & Francis Group, London.
- FARMER A. M. (1993): The effects of dust on vegetation – a review. – *Environmental Pollution*, 79: 63–75, Elsevier, Amsterdam.
- FAVERO-LONGO S. E. & PIERVITTORI R. (2010): Lichen-plant interactions. – *Journal of Plant Interactions*, 5: 163–177, Taylor & Francis Group, London.
- FINK M. H. (1984): Das Karstgebiet beim Hochtort (Hohe Tauern, Salzburg-Kärnten). – *Die Höhle*, 35 (Festschrift H. Trimmel): 127–134, Wien.
- FOLCO L. & CORDIER C. (2015): Micrometeorites. – *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, 15: 253–297, Mineralogical Society of Great Britain & Ireland.
- FRANK W. (1969): Geologie der Glocknergruppe. – *Wissenschaftliche Alpenvereins Hefte*, 21: 5–114, München.
- FRANCHY G., OJEDA A., LÓPEZ-CANCIO J. & HERNANDEZ-LEON S. (2013): Plankton community response to Saharan dust fertilization in subtropical waters of the Canary Islands. – *Biogeosciences Discussions*, 10: 17275–17307, Copernicus Publications, Göttingen.
- GENGE M., ENGRAND C., GOUNELLE M. & TAYLOR S. (2008): The classification of micrometeorites. – *Meteoritics & Planetary Science*, 43: 497–515, Wiley Online Library.
- GLASS B. P. (1990): Tektites and microtektites: Key facts and inferences. – *Tectonophysics*, 171: 393–404, Elsevier, Amsterdam.
- GRIFFIN D. W., KELLOGG C. A. & SHINN E. A. (2001): Dust in the wind: Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health. – *Global Change & Human Health*, 2: 20–33, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- GRUBER F. 1980: Die Verstaubung der Hochgebirgsböden im Glocknergebiet: 69–91. In: FRANZ H. (Hrsg.) (1980): Untersuchungen an alpinen Böden in den Hohen Tauern 1974–1978, Stoffdynamik und Wasserhaushalt. – Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern, Bd. 3. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 295 S.
- HÖHAM R. W. & REMIAS D. (2020): Snow and Glacial Algae: A Review. – *Journal of Phycology*, 56: 264–282.
- HUBER K., PEER T., TSCHAIKNER A., TÜRK R. & GUBER J. P. (2007): Characteristics and function of soil crusts in different successional stages in alpine environments, outlined on an alpine lime scree in the Großglockner region (Austria). – *Mitteilungen der Bodenkundlichen Gesellschaft Wien*, 74: 111–126, Wien.
- HÜTTER C. M. (2014): Grenzwanderung übers Hochtort: 121–130. In: IBETSBERGER H., STEYRER H., HEJL E. & SCHRÖTT L. (Hrsg.) (2014): Grenzwanderungen. Natur- und Kultur-erlebnisführer der Universität Salzburg. Bd. 3. Universität Salzburg, Verlag Pfeil, München, 160 S.
- INSAM H. (1996): Microorganisms and humus in soils, chapter 6: 265–292. In: PICCOLO A. (1996): Humic substances in terrestrial ecosystems. Elsevier, Amsterdam, 675 S.

- JUNG P., BRIEGEL-WILLIAMS L., SIMON A., THYSSEN A. & BÜDEL B. (2018): Uncovering biological soil crusts: carbon content and structure of intact arctic, antarctic and alpine biological soil crusts. – *Biogeosciences*, 15: 1149–1160, Copernicus Publications, Göttingen.
- KANDUTSCH G. (2015): Das Hochtor: Ein hochalpiner Passübergang durch die Jahrtausende: 13–29. In: HÖRL J. & SCHÖNDORFER D. (Hrsg.) (2015): *Die Großglockner Hochalpenstraße. Erbe und Auftrag*. Böhlau Verlag, Wien, Köln, Weimar, 504 S.
- KINZEL H. (1983): Influence of limestone, silicates and soil pH on vegetation: 201–244. In: LANGE O. L., NOBEL P. S., OSMOND C. B. & ZIEGLER H. (Eds.) (1983): *Physiological Plant Ecology III. Encyclopedia of Plant Physiology (New Series)*, 12. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 625 S.
- KÜFMANN C. (2003): Soil types and aeolian dust in high mountainous karst of the Northern Calcareous Alps. (Zugspitzplatt, Wetterstein Mountains, Germany). – *Catena*, 53: 211–227, Elsevier, Amsterdam.
- KÜFMANN C. (2008a): Are Cambisols in alpine karst autochthonous or eolian in origin? – *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40: 506–518, Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), University of Colorado.
- KÜFMANN C. (2008b): Flugstaubeintrag und Bodenbildung im Karst der Nördlichen Kalkalpen. Nationalpark Berchtesgaden. – *Forschungsbericht*, 54, Nationalparkverwaltung Berchtesgaden, 189 S.
- LANGHANS T. M., STORM CH. & SCHWABE A. (2009): Biological soil crusts and their micro-environment: Impact on emergence, survival and establishment of seedlings. – *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 204: 157–168, Elsevier, Amsterdam.
- LAPEYRIE F. (1990): The role of ectomycorrhizal fungi in calcareous soil tolerance by “symbiocalcicole” woody plants. – *Annals for Forest Science*, 21: 579–589, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- LIAN B., CHEN Y., LIUN Z. & YANG R. (2008): Effect of microbial weathering on carbonate rocks. – *Frontiers in Earth Science*, 15: 90–99, Lausanne.
- MAKI T., LEE K. C., KAWAI K., ONISHI K., HONG C. S., KUROSAKI Y., MAKI T., LEE K. C., KAWAI K., ONISHI K., HONG C. S., KUROSAKI Y., SHINODA M., KAI K., IWASAKA Y., ARCHER S. D. J., LACAP-BUGLER D. C., HASEGAWA H. & POINTING S. B. (2019): Aeolian dispersal of bacteria associated with desert dust and anthropogenic particles over continental and oceanic surfaces. – *Journal for Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 5579–5588, Wiley Online Library.
- MEOLA M., LAZZARO A. & ZEYER J. (2015): Bacterial composition and survival on Sharan dust particles transported to the European Alps. – *Frontiers in Microbiology*, 6: 1–17, Lausanne.
- MUHS D. R., PROSPERO J. M., BADDOCK M. C. & GILL. T. E. (2014): Identifying sources of aeolian mineral dust: present and past: 51–74. In: KNIPPERTZ P. & STUUT J.-B.W. (Eds.) (2014): *Mineral dust: A key player in the earth system*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Dordrecht–Heidelberg–New York–London, 509 S.
- OKIN G. S., MAHOWALD N., CHADWICK O. A. & ARTAXO P. (2004): Impact of desert dust on the biogeochemistry of phosphorus in terrestrial ecosystems. – *Global Biogeochemical Cycles*, 18: 1–9, Wiley Online Library.
- NEMERGUT D. R., ANDERSON S. P., CLEVELAND C. C., MARTIN A. P., MILLER A. E., SEIMON A. & SCHMIDT S. K. (2007): Microbial community succession in an unvegetated, recently deglaciated soil. – *Microbial Ecology*, 53: 110–122, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- PEER T., TÜRK R., GRUBER J. P. & TSCHAIKNER A. (2010): Species composition and pedological characteristics of biological soil crusts in a high alpine ecosystem, Hohe Tauern, Austria. – *Eco.mont - Journal on Protected Mountain Areas Research and Management*, 2: 5–12, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

- PEER T., TÜRK R. & GRUBER J. P. (2011): Alpine Vegetation und Böden im Karstgebiet zwischen Hochtor und Kärntner Schareck: 116–128. In: STEYRER H., HEJL E., IBETSBERGER H. & SCHROTT L. (Hrsg.) (2011): Hohe Tauern – Naturkundliche Exkursionen. Natur- und Kulturerlebnissführer der Universität Salzburg, Bd. 2. Universität Salzburg, Verlag Pfeil, München, 160 S.
- RAVI S., D'ODORICO P., BRESHEARS D. D., FIELD J. P., GOUDIE A. S., HUXMANT T. E., LI J., OKIN G. S., SWAP R. J., THOMAS A. D., VAN PELT S., WICKER J. J. & ZOBECK T. M. (2011): Aeolian processes and the biosphere. – *Reviews of Geophysics*, 43: 1–45, Wiley Online Library.
- REITBAUER V. (2010): Zum calcicolen-calcifugen Komplex. Das Vorkommen „acidophiler“ Gefäßpflanzen auf Karbonatböden im Glocknergebiet. – Masterarbeit, Universität Salzburg, 105 S.
- RIME T., HARTMANN M. & FREY B. (2016): Potential sources of microbial colonizers in an initial soil ecosystem after retreat of an alpine glacier. – *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology (ISME Journal)*, 10: 1625–1641, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg Limited.
- RIZZOLO J., BARBOSA C., BORILLO G., GODOI A., SOUZA R., ANDREOLI R., MANZI A., SÁ M., ALVES E., PÖHLKER C., HRABE DE ANGELI I., DITAS F., SATURNO J., MORAN-ZULOAGA D., RIZZO L., ROSARIO N. É., PAULIQUEVIS T., YAMAMOTO C., ANDRAE M. & GODOI R. H. M. (2016): Mineral nutrients in Saharan dust and their potential impact on Amazon rainforest ecology. – *Atmospheric chemistry and physics, discussions*: 1–43, Copernicus publications, Göttingen.
- ROSSI F., LI H., LIU Y. & DE PHILIPPIS R. (2017): Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. – *Earth-Science Reviews*, 171: 28–43, Elsevier, Amsterdam.
- ROZENSTEIN O., ZAADY E., KATRA I., KARNIELI A., ADAMOWSKI J. & YIZHAQ H. (2014): The effect of sand grain size on the development of cyanobacterial biocrusts. – *Aeolian Research*, 15: 217–226, Elsevier, Amsterdam.
- SCHMIDT S. K., SASHA C. R., REED S. C., NEMERGUT D. R., STUART GRANDY A., CLEVELAND C. C., WEINTRAUB N. 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 recently deglaciated soils. – *Proceedings of the Royal Society B*, 275: 2793–2802, The Royal Society, London.
- SUCHODOLEZT H. V., GLASER B., THRIFFLETON T., BRODER T., ZANG U., EIGENMANN R., KOPP B., REICHERT M. & ZÖLLER L. (2013): The influence of Saharan dust deposits on La Palma soil properties (Canary Islands, Spain). – *Catena*, 103: 44–52, Elsevier, Amsterdam.
- WARREN S. D., LARRY L., CLAIR ST., STEVEN D. & LEAVITT S. D. (2018): Aerobiology and passive restoration of biological soil crusts. – *Aerobiologia*, 35: 45–56, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- WEBER B., BOWKER M., ZHANG Y. & BELNAP J. (2016): Natural recovery of biological soil crusts after disturbance: 479–498. In: WEBER B., BÜDEL B., BELNAP J. (Eds.) (2016): *Biological Soil Crusts: An organizing principle in drylands*. – *Ecological Studies*, 226. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 549 S.
- WILLIAMS A. J., BUCK B. J. & BEYENE M. A. (2012): Biological Soil Crusts in the Mojave Desert, USA.: Micromorphology and Pedogenesis. – *Soil Science Society of America Journal*, 76: 1685–1695, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Wiley Online Library.
- WILLIAMS L., LOEWEN-SCHNEIDER K., MAIER S. & BÜDEL B. (2016): Cyanobacterial diversity of western European biological soil crusts (BSCs) along a latitudinal gradient. – *FEMS Microbiology Ecology*, 92: 1–9, Oxford University Press.

- WILLIAMS L., JUNG P., ZHENG L. J., MAIER S., PEER T., GRUBE M., WEBER B. & BÜDEL B. (2017): Assessing recovery of biological soil crusts across a latitudinal gradient in Western Europe. – *Restoration Ecology*, 26: 543–554, Wiley Online Library.
- WOHLGEMUTH T. & GIGON A. (2003): Calcicole plant diversity in Switzerland may reflect a variety of habitat templates. – *Folia Geobotanica*, 38: 443–452, Springer Netherlands.
- ZHANG Y., ÁSA L. A., ARADOTTIR M. S. & BOEKEN B. (2016): Interactions of Biological Soil Crusts with Vascular Plants: 385–406. In: WEBER B., BÜDEL B. & BELNAP J. (Eds.) (2016): *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*. – *Ecological Studies*, 226. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 549 S.
- ZHENG L.-J., MAIER S., GRUBE M., TÜRK R., GRUBER J. P. & PEER T. (2014): Alpine biological soil crusts on the Hochtor (Grossglockner high alpine route, Hohe Tauern, Austria): soils, function and biodiversity. – *Acta ZooBot Austria* (früher: *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich*), 150/151: 175–196, Wien.

Anschrift der Autor*innen

Univ.-Prof. Dr.
Thomas Peer,
Grenzweg 409,
5084 Großgmain,
E-Mail: Thomas.
Peer@sbg.ac.at

O. Univ.-Prof. Dr.
Franz Neubauer,
FB für Geologie
und Geographie,
Universität Salzburg,
Hellbrunner Straße
34, 5020 Salzburg,
E-Mail: Franz.Neu-
bauer@sbg.ac.at

Mag. Dr. Gertrude
Friedl, FB für Geolo-
gie und Geographie,
Universität Salzburg,
Hellbrunner Straße
34, 5020 Salzburg,
E-Mail: Gertrude.
Friedl@sbg.ac.at

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Carinthia II](#)

Jahr/Year: 2021

Band/Volume: [211_131_2](#)

Autor(en)/Author(s): Peer Thomas, Neubauer Franz, Friedl Gertrude

Artikel/Article: [Das Hochtlor, ein internationales Forschungsgebiet für biologische Bodenkrusten und weiterführende Untersuchungen 81-98](#)