DOI:10.11576/biuz-XXXX

Ökologische Nischen für Pioniere in der Atacama

Die Grüne Wüste Südamerikas?

Karen Baumann | Patrick Jung | Lukas W. Lehnert | Elena Samolov | Christel Baum | Jörg Bendix | Ulf Karsten | Burkhard Büdel | Peter Leinweber

Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten sind uralte Pionierorganismen. Auch in Wüsten können sie Fuß fassen, selbst wenn vermeintlich kein Wasser zur Verfügung steht, um Photosynthese zu betreiben. Wie perfekt sie an das Leben in der Atacama-Wüste Chiles angepasst sind und welche Strategien sie entwickelt haben, um an das benötigte Wasser und ausreichend Nährstoffe zu kommen, war in den letzten Jahren Gegenstand gleich mehrerer, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderter Projekte.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite ■■■ erklärt.

Die Atacama ist eine der ältesten Wüsten und einer der extremsten Standorte auf unserem Planeten. Sie erstreckt sich über 3.500 km entlang der Pazifikküste Perus und Chiles und umfasst ein Gebiet von über 200.000 km^2 [1]. Während die Temperaturen in der Atacama mit Werten zwischen +9 und +28 °C vergleichsweise mild sind, bringt besonders der äußerst geringe und unbeständige Niederschlag das Leben hier an seine Grenzen [1]. Im Norden Chiles sind es im Durchschnitt weniger als 1 mm, in der südlichen Atacama bis zu 130 mm im Jahr. An manchen Stellen wurde noch nie Niederschlag gemessen. Im Vergleich dazu beträgt der jährliche Niederschlag in Deutschland im Schnitt etwa 800 mm.

Wie aber kommt es dazu, dass eine Region zwischen Pazifik und den Anden kaum Niederschlag erhält? Grund hierfür sind die ablandigen Winde des Südostpassats. Durch sie werden warme, höherliegende Luftmassen vom Land über tieferliegende Meeresluftmassen gelegt, die durch den Humboldtstrom kaltfeucht sind. Ein Aufstieg von niederschlagsbringenden Wolken wird damit verhindert.

Nur in Jahren mit dem Klimaphänomen *El Niño*, in denen durch schwächere Passatwinde die kalten Wassermassen des Humboldtstroms durch wärmere verdrängt werden, kann es lokal zu einzelnen stärkeren Niederschlagsereignissen kommen – so zuletzt in der südlichen Atacama im Jahr 2015. Hier wurde örtlich die für die Region außergewöhnliche Menge von über 80 mm Niederschlag gemessen. Dies führte allerdings zu starker Landerosion durch Oberflächenabtrag und nur kurzzeitig zu blühenden Landschaften. Von welchem Wasser aber lebt die Wüste in den trockenen Jahren? Und welche Strategien haben die Organismen entwickelt, um an Nährstoffe zu gelangen?

Online-Ausgabe unter: www.biuz.de

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

Die Nebeloase

Wenn auch nicht durch Regen, so erhalten höhergelegene Küstenregionen der Atacama doch einen bedeutenden Wassereintrag durch Nebel, der durchschnittlich bei erstaunlichen 0,125 mm am Tag liegt [2]. Die feuchtkalte Meeresluft strömt dabei vom Pazifik ins Landesinnere, und Wasser kondensiert in feinsten Tröpfchen als Nebel, *camanchaca* („Finsternis"), wie ihn die Einheimischen nennen. Dadurch entstehen regelrechte „Nebeloasen" in der Landschaft. Eine davon liegt im Nationalpark „Pan de Azúcar" („Zuckerhut") in der südlichen Atacama, dessen 438 km^2 große Fläche unter Schutz gestellt ist (Abbildung 1a). Hier ragt ein steiles Hochplateau direkt an der Küste bis 850 m über den Meeresspiegel, das zum Landesinneren hin ausläuft. In der hügeligen Landschaft ist das granitische Ausgangsgestein in weiten Bereichen bereits teilweise verwittert und der beige-braune Rohboden ist großflächig mit kleinen, meist nur etwa einen halben Zentimeter großen Quarzsteinchen übersät, die lokal ‚maicillo' genannt werden (Abbildung 1b).

ABB. 1 Fauna und Flora des Nationalparks „Pan de Azúcar" in der küstennahen Atacama-Wüste Chiles. a) Landschaftsaufnahme. b) Mit Quarzsteinchen bedeckter Wüstenboden. c) Säulenförmiger Kaktus *Copiapoa cinerea* subsp. *columna-alba* mit gelbem Flechtenaufwuchs der Gattung *Chrysothrix*. d) Euphorbienbusch (*Euphorbia lactiflua*) besetzt mit verschiedenen Flechten. e) Spitze einer *Eulychnia* sp.-Kaktee, deren Dornen mit buschigen Flechten der Gattung *Ramalina* und *Usnea* besetzt sind sowie *Roccellinastrum spongioideum* an den Dornenspitzen. Fotos: a, c) K. Baumann, b, d–e) P. Jung.

Obwohl flüssiges Wasser und verfügbare Nährstoffe in dieser unwirtlichen Gegend rar sind, wachsen hier neben kleinen Büschen und einjährigen Pflanzen auch ▸ Geophyten – zumindest in Küstennähe. Für das Auge weithin sichtbar prägen Kakteen aus den Gattungen *Echinopsis*, *Eulychnia* und *Copiapoa* mit ihren langen Dornen das Bild der Nebelwüste (Abbildung 1). Mit diesen dichtstehenden Blattdornen halten sie nicht nur hungrige Fressfeinde auf Abstand. Gleichzeitig siedelt auf ihnen eine Vielzahl verschiedenster Flechtenarten (Abbildung 1c–e). Mit ihrer zum Teil bartartigen Wuchsform „kämmen" sie die Nebeltröpfchen regelrecht aus der Luft aus. Das von ihnen selber nicht sofort aufgenommene Wasser tropft von dort praktischerweise direkt in den Wurzelbereich der Kakteen.

Cyanobakterien beleben Gestein

Cyanobakterien (früher bekannt als Blaualgen) und Grünalgen leben frei oder in Symbiose mit Pilzen. Ihr Auftreten und ihre Artenzusammensetzung in der Wüste sind besonders interessant, da sie als Sauerstoff produzierende Pionierorganismen bereits seit Millionen von Jahren unser Klima mitgestalten. Selbst im Extremklima von Wüsten kommen sie vor [3]. Aus der Atacama sind bislang nur wenige Cyanobakterienarten bekannt. Allerdings wurde bereits 1960 das große Potenzial unbekannter Cyanobakterienarten in Chile und insbesondere in der Atacama erkannt [4]. Neu entdeckt wurden jetzt die einzellige Art *Aliterella chasmolithica* (Abbildung 2a), die aus natürlichen Ritzen des Granitgesteins isoliert wurde, sowie die an Quarzsteinen vorkommenden Arten *Gloeocapsopsis diffluens* und *G. dulcis* [5]. Die ▸ filamentöse (fadenförmige) Art *Kastovskya adunca* (Abbildung 2b), welche in Gips vorkommt, und die Stickstoff-fixierende Art *Scytonema hyalinum* (Abbildung 2c) wurden hingegen im Boden angetroffen.

IN KÜRZE

- *Im Nationalpark Pan de Azúcar in der südlichen Atacama-Wüste leben zahlreiche Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten, die Teil* ***biologischer Bodenkrusten*** *sind.*
- *Durch morphologische Anpassungen und den* ***weltweit geringsten Wasserbedarf*** *können sie im Extremklima der trockensten Wüste der Erde überleben.*
- *Die* ***außergewöhnlich hohe Enzymaktivität*** *dieser Pionierorganismen deutet auf einen effizienten Aufschluss von Nährstoffen hin.*
- *Durch Verwitterungsaktivität tragen diese Organismen* ***zur Bodenbildung bei*** *und formen die Landschaft mit.*
- *Die Entstehung des* ***schwarz-weißen Musters*** *in der Landschaft durch die „grit crust" ist bislang ungeklärt und bedarf weiterer Erforschung.*

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

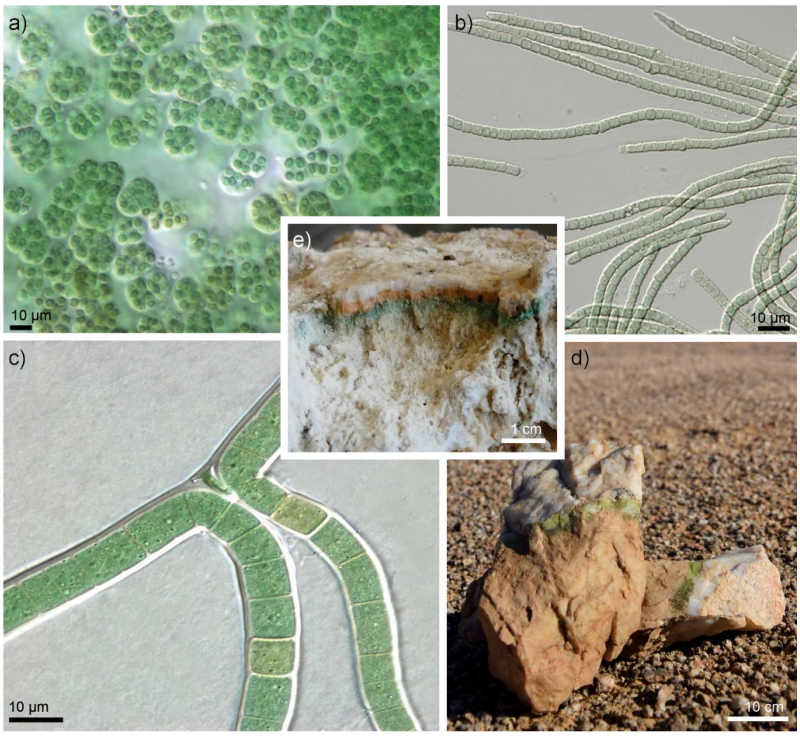

ABB. 2 Cyanobakterien und ihre Habitate. a) Einzellige *Aliterella chasmolithica*. b) Filamentöse *Kastovskya adunca*. c) Verzweigte *Scytonema hyalinum* mit zwei gelbgrün gefärbten Heterozyten zur Stickstofffixierung. d) Ausgegrabene Quarzsteine mit grünem Biofilm, der von zahlreichen Cyanobakterien und Grünalgen gebildet wird. e) Angeschlagener Gipsblock mit blaugrünem Biofilm wenige Millimeter unter der Oberfläche. Fotos: P. Jung.

Als eine der ältesten Lebensformen besitzen Cyanobakterien keinen Zellkern und gehören somit zu den Prokaryonten. Sie betreiben Photosynthese und verringern damit auch die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) in der Atmosphäre. Gleichzeitig produzieren sie Zucker und, als Abfallprodukt, Sauerstoff (O_2). Viele von ihnen fixieren zudem Stickstoff (N) aus der Luft und machen auf diese Weise dieses Nährelement spätestens nach ihrem Ableben auch anderen Lebewesen zugänglich. Durch einzigartige Pigmente können Cyanobakterien sogar die Lichtausnutzung für die Photosynthese steigern. Dies hat den Vorteil, dass einige Cyanobakterien auch in porösem Gipsgestein einige Millimeter unter der Oberfläche leben (endolithisch) oder an der Unterseite lichtdurchlässiger Quarzsteine (hypolithisch) siedeln können (Abbildung 2d). Der Quarzstein bietet dabei Schutz vor zu hoher zellschädigender UV-Strahlung der Wüstenbreiten und stellt zudem eine besonders günstige Wasserversorgung bereit: Da der Stein nachts schneller abkühlt als die ihn umgebende Luft, wird an der Grenzfläche zum Stein die Luft zum Taupunkt abgekühlt und damit Tau als flüssiges Wasser ausgefällt. Diese Wassermengen reichen gerade für Cyanobakterien und Grünalgen zum Leben aus. Cyanobakterien sind Pioniere in der Erschließung von Mikrohabitaten wie etwa den ersten Millimetern des Bodens, Gips (Abbildung 2e), Ritzen im Gestein oder der Unterseite von Quarzsteinchen. Sie ermöglichen die Ansiedlung weiterer zahlreicher ▸ heterotropher Mikroorganismen, die von ihren Stoffwechselprodukten leben können.

Grünalgen in Flechten: Auf Kakteen und am Boden

Im Gegensatz zu Cyanobakterien haben Grünalgen wie beispielsweise *Trebouxia* sp. einen echten Zellkern und werden damit den Eukaryonten zugerechnet. Sie sind ebenfalls in der Lage, Photosynthese zu betreiben. Allerdings fehlt ihnen die Möglichkeit, Stickstoff direkt aus der Luft zu nutzen. Sie sind damit auf anderweitige Versorgung mit Nährstoffen angewiesen. Im Nationalpark „Pan de Azúcar“ spielen Grünalgen vor allem als Symbiosepartner in Flechten eine entscheidende Rolle. In der Alge-Pilz-Symbiose übernehmen sie als Photobiont durch Photosynthese die Produktion von Zuckern, während der Mykobiont – der Pilzpartner – Nährstoffe wie z. B. Phosphat erschließt und verfügbar macht.

IDENTIFIZIERUNG VON MIKROORGANISMEN

Die nur wenige hundertstel Millimeter großen Cyanobakterien und Grünalgen bestimmen Forscher unter dem Lichtmikroskop morphologisch, also nach ihrem äußeren Aufbau. Um Sicherheit zu erlangen, werden einzelne Organismen dann in einer Petrischale mit verfestigtem Nährboden vermehrt und nach serieller Übertragung auf neue Nährmedien vereinzelt. Nach einigen Monaten ist eine Cyanobakterien- oder Grünalgen-Kultur entstanden, die jetzt mit molekularbiologischen Methoden untersucht wird. Zunächst wird die DNA, das Erbgut, aus den Cyanobakterien oder Grünalgen isoliert und mit Hilfe der Polymerasekettenreaktion (PCR = engl. Polymerase Chain Reaction) vervielfältigt. Eine anschließende Sequenzierung verrät die Reihenfolge der einzelnen Nukleotidbausteine. Ein sogenannter BLAST (Basic Local Alignment Search Tool), ein Algorithmus zum Vergleich von Sequenzen, bestimmt dann die Ähnlichkeit der neuen mit bereits bestehenden DNA-Sequenzen aus der Gendatenbank von bekannten Organismen. Die Verwandtschaftsverhältnisse der einzelnen Algen können anhand ihrer DNA-Sequenzen in phylogenetischen Stammbäumen errechnet und graphisch dargestellt werden. Finden sich hierbei Unterschiede in bestimmten DNA-Abschnitten oder deren Aufbau/Morphologie, kann unter Abgleich mit bestehender Literatur eine neue Art benannt und beschrieben werden.

*Nach demselben Prinzip erfolgt auch die Benennung von Flechten, wobei hier Mikroalge und Pilzpartner der Symbiose getrennt bestimmt werden. Im Nationalpark „Pan de Azúcar“ wurden mehrere neue Cyanobakterien- und Grünalgenarten sowie Flechten entdeckt. Darunter eine gelblich-grün erscheinende, den Boden besiedelnde Flechte, die den Namen „*Acarospora conafii *spec. nov. P. Jung et B. Büdel“ erhielt. Dabei bezeichnet* Acarospora *die Gattung des flechtenbildenden Pilzes,* conafii *wurde zu Ehren der chilenischen Forstbehörde CONAF (Corporación Nacional Forestal) als Flechten-Artbezeichnung angehängt. „P. Jung et B. Büdel“ verweist auf die beiden erstbeschreibenden Forscher.*

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

Flechten, die auf Kakteen aufsitzen, sogenannte Epiphyten, kommen in besonders großer Vielfalt im Nationalpark vor. Aber auch auf dem Boden lebt eine große Fülle von Flechten (Abbildung 3a-d). Interessanterweise können epiphytische Flechten wie *Everniopsis trulla* oder *Ramalina thrausta* (Abbildung 3e, f) bereits hohe Luftfeuchtigkeit um die 90 Prozent zur Photosynthese nutzen [6]. Sie sind damit viel weniger abhängig von Nebel, Tau oder Regen als ihre bodennahen Verwandten. Trotzdem sind sie, ebenso wie die auf dem Boden wachsenden Flechten *Placidium* sp. oder *Acarospora conafii* (erst kürzlich entdeckt; siehe Kasten) auf flüssiges Wasser aus Nebeltröpfchen angewiesen, denn nur der Nebel tritt tatsächlich regelmäßig auf.

Bereits drei Minuten nach dem Auftreten von Nebel erreichen einige der Flechten schon über 27 Prozent ihrer maximalen Photosyntheseleistung [6]. Dabei können sie aus einem Nebelereignis insgesamt zwischen 8 und 24 Prozent des verfügbaren Wassers aufnehmen [7]. Flechten wie *Placidium* sp. zeigen noch eine weitere Anpassung: Sie sind von einer dicken Schicht abgestorbener Pilzzellen umgeben, der sogenannten „epinekralen Schicht" (Abbildung 3b). Wie ein Schwamm saugt diese Wasser auf, und die Flechte kann so ihre photosynthetisch aktive Zeit verlängern. Damit nutzen die Organismen jede Möglichkeit in der trockenen Umgebung, Wasserquellen optimal auszuschöpfen. Eine weitere erstaunliche Anpassung an dieses unwirtliche Ökosystem ist die Ausbildung von Algenstapeln (Abbildung 3d). Hier sind die Algen nicht, wie für Flechten üblich, als ein grünes horizontales Band angeordnet, sondern in vertikalen Stapeln. Dadurch wird die überwiegende Anzahl an Grünalgen vor Starklicht geschützt, das maximal die dem Algenstapel oben aufliegenden Algenzellen schädigen kann.

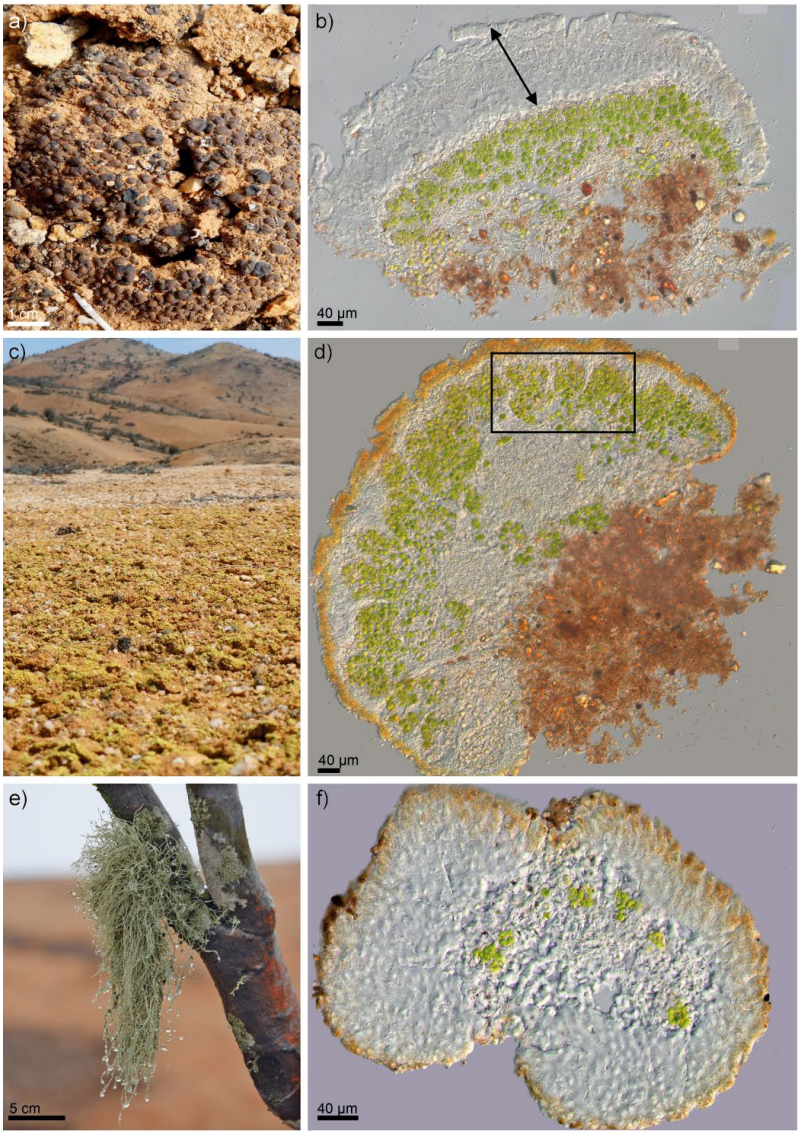

ABB. 3 Flechten im Detail. a) Aufsicht von *Placidium* sp. b) Mikroskopischer Querschnitt von *Placidium* sp. mit Grünalgen-Photobionten der Gattung *Trebouxia*. Der Pfeil zeigt die Mächtigkeit der wasserspeichernden Epinekralschicht aus abgestorbenen Pilzhyphen. c) Die gelbgrüne *Acarospora conafii*. d) Mikroskopischer Querschnitt von *A. conafii* mit dem Grünalgen-Photobionten *Trebouxia* sp., Algenstapel in Umrahmung. e) Die epiphytische *Ramalina thrausta* tropfnass nach Nebel. f) Mikroskopischer Querschnitt eines runden Thallusstücks von *R. thrausta*. Fotos: a–d) P. Jung, e) K. Baumann, f) P. Jung, d–f aus [6].

Mikrobielle Lebensgemeinschaft als Landschaftsbildner

Obwohl sie eine der wohl wichtigsten Lebensgemeinschaften in der Atacama darstellt, lässt sie sich auf den ersten Blick kaum erkennen – die biologische Bodenkruste, die auf tausenden von kleinen Quarzsteinchen wächst, welche die Oberfläche der Wüste im Nationalpark „Pan de Azúcar" bedecken (Abbildung 4a). Bei Trockenheit ist die erst kürzlich entdeckte und als „grit crust" bezeichnete Kruste nur an einer etwas dunkleren Färbung der durch Mikroorganismen besiedelten Steinchen im Vergleich zu unbesiedelten Stellen erkennbar (Abbildung 4a). Erst bei Nebel werden die einzelnen Organismen unmittelbar aktiv. Der gräuliche Thallus der Flechten quillt dann durch die Aufnahme von Nebelwasser auf und erzeugt innerhalb weniger Minuten eine deutliche schwarz-grüne Färbung der Steinchen, und die Photosynthese der Flechten, Cyanobakterien und Grünalgen startet (Abbildung 4b–d).

Jedes einzelne Steinchen ist hier ein ganzer Mikrokosmos, auf dem unzählige Arten von Flechten und auch freilebenden Cyanobakterien und Grünalgen leben (Abbildung 4c, d). Die enge Vergesellschaftung von ▸ phototrophen Mikroorganismen stellt auch hier die Grundlage für die zusätzliche Ansiedlung von heterotrophen Mikroorganismen wie Bakterien und Pilzen dar (Abbildung 4e, f). Die Diversität der vorkommenden Mikroorganismen ist dabei noch nicht einmal ansatzweise erforscht. Fakt ist, dass diese Organismen durch ihr Wachstum die vielen Einzelsteinchen miteinander verbinden und auf diese Weise eine Kruste bilden können, die den Boden vor Winderosion schützt. Untersuchungen zeigten, dass die „grit crust" signifikant zum Kohlenstoffgehalt des Bodens beiträgt. Der

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

Gehalt an organischem Kohlenstoff liegt dort, wo die „grit crust“ verbreitet ist, zurzeit bei 3 g C_{org} pro Quadratmeter im obersten Bodenzentimeter [2]. Wie weit aber ist sie tatsächlich verbreitet? Drohnenflüge sollten hierzu Auskunft geben. Auf Aufnahmen ihrer Kameras war das schwarz-weiße Muster in der Wüste, das besiedelte und unbesiedelte Flächen hervorrufen, deutlich erkennbar. Mittels digitaler Berechnungen ergab sich dabei für den Nationalpark „Pan de Azúcar“ eine Fläche von 350 km^2, die mit den kleinen Steinchen bedeckt war. Einzelne Steinchen waren dabei zwischen 20 und 80 Prozent mit Organismen besiedelt. Insgesamt waren demzufolge 88 km^2 des Nationalparks (25 % der Gesamtfläche) reine „grit crust“ [2].

Die starke Verbreitung an einem solch unwirtlichen Ort lässt auf eine optimale ökophysiologische Anpassung der beteiligten Mikroorganismen schließen. Die maximale Photosyntheseleistung der „grit crust“-Lebensgemeinschaft konnte im Laborexperiment, in dem die „grit crust“ nach totaler Wassersättigung schrittweise ausgetrocknet wurde, bei 0,250 mm Wasser festgestellt werden. Dieses ist die weltweit geringste bekannte Wassermenge, die für Photosynthese von vergleichbaren Organismen benötigt wird. Da durchschnittlich 0,125 mm Wasser am Tag aus Nebelereignissen im Nationalpark „Pan de Azúcar“ zur Verfügung stehen, erbringt die „grit crust“ hier zumeist immerhin 65 Prozent ihrer vollen Photosyntheseleistung [2].

Ein Großteil des in der „grit crust“ fixierten Kohlenstoffs wird in organische aromatische Verbindungen eingebaut. Viele dieser Substanzen sind hydrophob, also Wasser abweisend. Dies erscheint zunächst als ein Widerspruch, ist aber tatsächlich von vielen Biokrusten trockener Ökosysteme bekannt [8]. Indem die Organismen einen Überschuss an Wasser abweisen, verhindern sie einen Abfall der Photosyntheseleistung, der auch bei einem Überschuss an Wasser auftritt, da der Wasserfilm den Gasaustausch während der Photosynthese hemmt. Die „grit crust“ ist somit perfekt an die Gegebenheiten in der Wüste angepasst. Es bleibt lediglich die Frage, wie sich die Organismen auf diesen Steinchen „ernähren“. Denn schließlich brauchen sie auch Nährelemente wie Kalium, Calcium, Magnesium oder Phosphor.

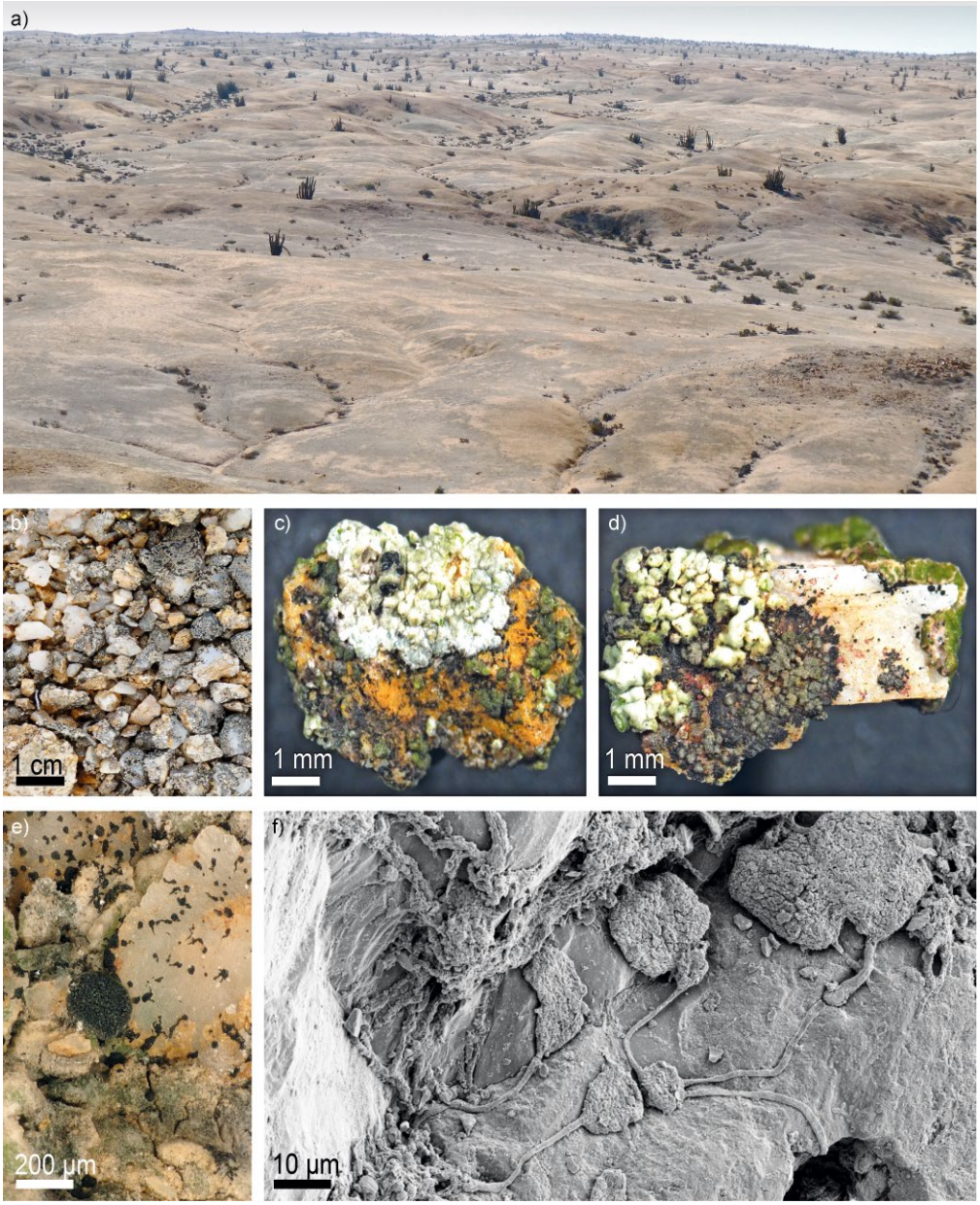

ABB. 4 Die „grit crust“ im Nationalpark. a) Landschaftsaufnahme, die schwärzliche Flecken zeigt, wo die „grit crust“ sich ausbreitet. b) Die Nahaufnahme der „grit crust“ lässt erkennen, dass die hellen Quarzsteinchen durch mikrobiellen Bewuchs dunkel erscheinen. c, d) Detailaufnahmen einzelner Grit-Steine, die stark von verschiedenen Flechten bewachsen sind. e) Detailaufnahme eines Grit-Steinchens mit schwarzem Bewuchs von heterotrophen Pilzen der Ascomycetengattung *Lichenothelia*. f) Rasterelektronenmikroskopie der Grit-Oberfläche mit runden neuetablierten Thalli der *Lichenothelia*-Pilze, die mit ihren Ausläuferhyphen Nährstoffe erschließen. Fotos: P. Jung.

Nährstoffakquise

Anders als wir es beispielsweise aus Wäldern der gemäßigten Breiten kennen, sind in Wüstenökosystemen noch keine dicken humosen Schichten im Oberboden ausgebildet, die als Nährstoffspeicher und -reservoir dienen könnten. In Wüsten müssen daher die meisten der benötigten Nähr-

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

stoffe noch direkt aus dem Gestein herausgelöst werden. Dies können Pionierorganismen besonders gut und machen ihrem Namen damit alle Ehre. Die Pilzpartner von „grit crust"-Flechten wurden dabei beobachtet, wie sie bei der Erschließung von Nährstoffen mit ihren Hyphen tief ins Gestein eindringen (Abbildung 5a). Nicht immer aber müssen die Organismen lange in der Tiefe suchen. Auch durch Staub werden Nährstoffe bereitgestellt. In der Atacama können es in einem Monat bis zu 4 g Staub pro Quadratmeter mit beispielsweise 0,4 Prozent Phosphor sein [9, 10].

Um einzelne Nährstoffe aus größeren Molekülkomplexen herauszulösen, produzieren Organismen Enzyme und scheiden diese aus. Ein Beispiel hierfür sind Phosphatasen. Diese Eiweiße katalysieren die Abspaltung von Phosphat aus großen Molekülen. Die Abspaltung des Einfachzuckers Glucose von Mehrfachzuckern erfolgt durch Glucosidasen. Unterschiedliche Flechtenarten der Atacama zeigen ganz unterschiedliche Enzymaktivitäten (Abbildung 5b). Besonders auffällig dabei ist, dass bei diesen Flechtenarten eine zum Teil mehr als 100-fach erhöhte Enzymaktivität, verglichen mit der Enzymaktivität normaler Bodenproben aus den gemäßigten Breiten, gemessen wurde. Dies deutet auf eine sehr große Menge an Enzymen und/oder eine sehr effiziente Wirkungsweise dieser Organismen im Aufschluss von Nährstoffen hin. Grund hierfür könnten die in der Wüste nur sehr kurzen Feuchtigkeitsphasen sein, in denen dann aber so viel wie möglich an Nährstoffen für die Zellen in aufnehmbare Form gebracht werden muss.

Das Nebenprodukt – Verwitterung

Während die Organismen Lebensraum und karge Nahrung nutzen, tragen sie bedeutend dazu bei, ihre Umgebung zu formen. Dies geschieht auf chemische und physikalische Weise. Einige Cyanobakterien und Grünalgen beispielsweise betreiben Photosynthese und alkalisieren dabei gleichzeitig ihre Umgebung durch das entstehende Nebenprodukt Hydroxid (OH^-) [11]. Dieser Prozess spielt im Nationalpark „Pan de Azúcar" eine besondere Rolle, da hier Quarz eines der häufigsten Minerale ist. Quarz wird bei pH-Werten jenseits 7,5 zunehmend stärker aufgelöst [12]. Gleichzeitig sind bei neutralem pH-Wert Eisen und Aluminium schlecht löslich und es kommt zur Bildung von Tonmineralen – kleinsten Bodenteilchen, an die Nährstoffe angelagert werden, die Feuchtigkeit halten und die aufquellen und schrumpfen können.

Auch Pilzhyphen sind an der Verwitterung von Gestein beteiligt. Je nach Feuchtigkeit wird durch Quellung und Schrumpfung ihrer Hyphen das Gestein regelrecht gesprengt (Abbildung 5a). Durch den zyklisch auftretenden Nebel in der küstennahen Atacama verändert sich die Oberfläche eines einzelnen mit Mikroorganismen bewachsenen Steinchens um bis zu 24 Prozent [10]. Somit wird

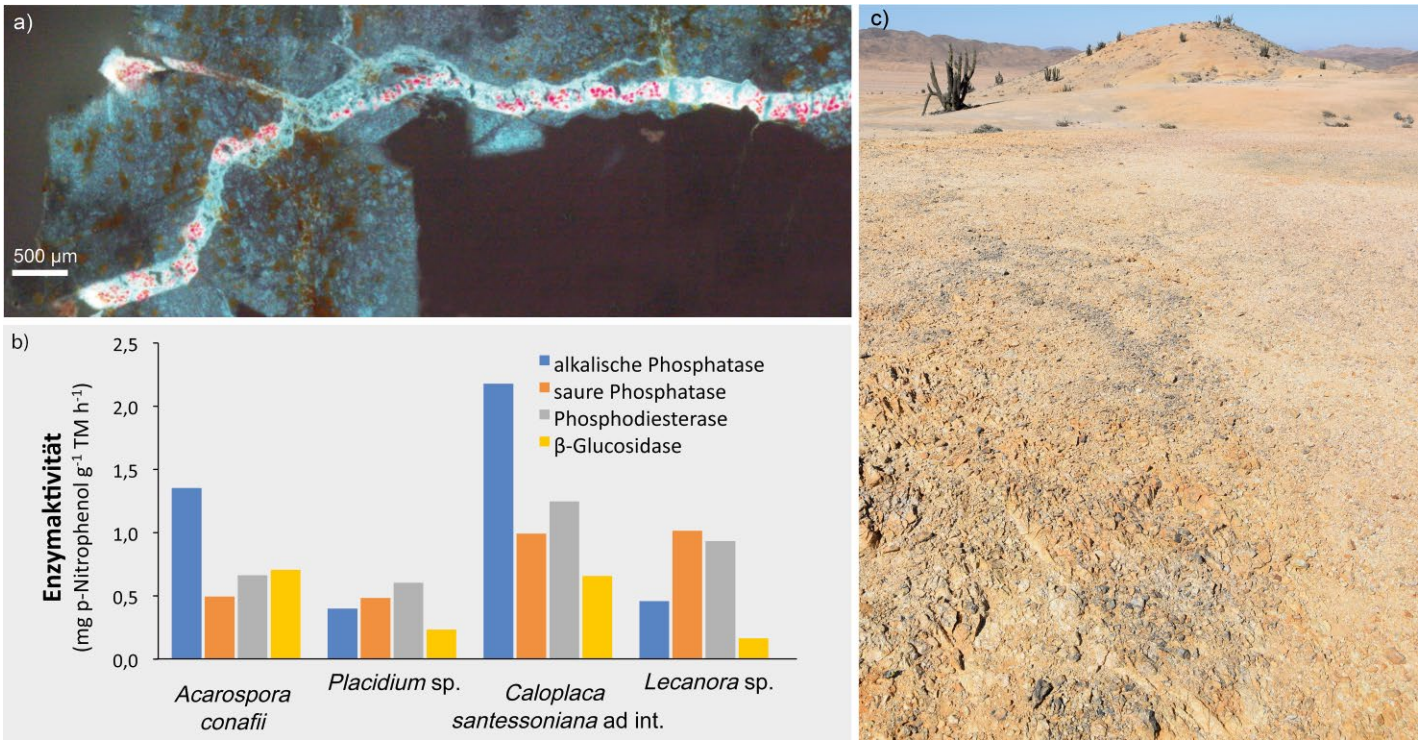

ABB. 5 Verwitterungseffekte der „grit crust". a) Dünnschliff eines Grit-Steinchens unter dem Fluoreszenzmikroskop mit Flechten, die von links nach rechts ins Innere des Steines gewachsen sind. Die Pilzhyphen erscheinen weißlich, die Grünalgen-Photobionten rötlich. b) Verschiedene Enzymaktivitäten vier verschiedener Flechten angegeben in Menge umgesetzten Substrats pro g Trockengewicht innerhalb einer Stunde. c) Landschaftsaufnahme, die im Vordergrund größere Felsstücke erkennen lässt, mit schwärzlichem mikrobiellem Besatz; im Hintergrund kleineres, stärker verwittertes Gestein mit der „grit crust". Fotos: a) P. Jung, c) K. Baumann.

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

GLOSSAR

Filamentös: *fadenförmige Struktur*

Geophyten: *mehrjährige, krautige Pflanzen mit unterirdischen Überdauerungsorganen wie z. B. Zwiebeln*

Heterotroph: *sich nur durch bereits vorhandene organische Substanzen ernährend*

Phototroph: *Nutzung von Licht als Energiequelle*

seit Jahrmillionen kompaktes Gestein langsam zerkleinert. Dieser Prozess kann quasi „im Zeitraffer" in der Atacama beobachtet werden. Dafür muss man sich die in der Landschaft verteilten unterschiedlichen Verwitterungsstadien in chronologischer Abfolge als „Chronosequenz" zusammengesetzt vorstellen (Abbildung 5c).

Mit der Besiedlung des Gesteins durch Organismen, seiner Zerkleinerung und Veränderung kommt es durch diverse Verwitterungsmechanismen allmählich zur Bodenbildung. In der heutigen Atacama ist an einigen Stellen bereits ein allererster Boden im eigentlichen Sinne entstanden, der als „terrestrischer Protopedon" angesprochen wird [10]. Dieser Boden enthält Calciumcarbonat und hat bisher nur einen sehr geringen Gehalt an organischem Kohlenstoff in der obersten Schicht. Berücksichtigt man nun das nahezu stabile Klima der Atacama sowie die frühe Entstehungsgeschichte von Pilzen, Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten, so lässt sich annehmen, dass diese biogenen Verwitterungsprozesse seit Millionen von Jahren in der Atacama stattfinden und so die Landschaft von den besiedelten Mikrohabitaten aus maßgeblich gestaltet wird.

Ähnliche, als biologische Bodenkrusten bezeichnete, mikrobielle Zusammenschlüsse kommen hauptsächlich in Trockengebieten der Erde vor. Dort können sie zu sehr alten, empfindlichen, mikrobiellen Lebensgemeinschaften werden. Aber auch in anderen Ökosystemen der Erde besiedeln Biokrusten-bildende Organismen den Boden, sobald freie Stellen durch zum Beispiel Baumfall, Feuer oder Vulkanausbrüche entstanden sind. Binnen kürzester Zeit können sich hier erste Formen einer Biokruste entwickeln, die Wasser, Staub und Nährstoffe binden, aber auch Temperatur- und Oberflächenstabilität des Bodens gewährleisten. Ihr Auftreten dient damit dem Erosionsschutz, da es Samen höherer Pflanzen zu keimen erlaubt und Nährstoffe für diese und Kleinstlebewesen bereithält.

Ungeklärte Fragen

Betrachtet man die Vielfalt der Mikroorganismen, die trotz der unwirtlichen Bedingungen in der Atacama lebt, so muss man feststellen, dass die Forschung hier erst am Anfang steht. Eine besonders interessante Frage ist auch die, wodurch das schwarz-weiße Muster der „grit crust" in der Landschaft entsteht. Möglicherweise sind hier topographische Effekte beteiligt, wie etwa Senken, in denen der Nebel länger verbleibt und damit an diesen Stellen mehr Wasser ins System einbringt. Dieses könnte zur Ansiedlung der bisher nur spärlich erforschten Mikroorganismen führen, die an der „grit crust" beteiligt sind. Auch Interaktionen zwischen einzelnen Organismengruppen wie etwa bestimmter Pilze können nicht ausgeschlossen werden. Einige könnten durch ihr parasitisches Verhalten die „grit crust" möglicherweise verdrängen und andernorts neu aufkeimen lassen. Das von der DFG geförderte Forschungsprojekt ‚Grit Life' von Dr. Patrick Jung soll diesen Effekt nun klären und in den nächsten Jahren zu neuen Erkenntnissen führen.

Zusammenfassung

Der Nationalpark „Pan de Azúcar" ist eine Nebeloase in der südlichen Atacama-Wüste Chiles. Er beherbergt eine Vielfalt an Cyanobakterien und Grünalgen, die insbesondere in Flechten vorkommen. Diversitätsaufnahmen und ökophysiologische sowie biochemische Untersuchungen zeigten, dass diese Lebewesen hervorragend an das Extremklima angepasst sind und schon bei geringsten Wassermengen aktiv werden können. Durch physikalische und chemische Veränderung ihrer Umwelt tragen sie damit zur Verwitterung von Gestein und Bodenbildung bei und sind an der Formung der Landschaft beteiligt.

Summary

The Green Desert of South America?

"Pan de Azúcar National Park" is a fog oasis in the southern Atacama Desert of Chile. It hosts a diversity of cyanobacteria and green algae, which can especially be found in lichens. Diversity surveys and eco-physiological and biochemical studies have shown that these organisms are excellently adapted to the extreme climate and can already become active even if the amount of water available is very low. By changing their environment physically and chemically, they contribute to the weathering of rocks and soil formation and are thus involved in shaping the landscape.

Schlagworte:

Atacama, biologische Bodenkruste, Nebel, Verwitterung

Danksagung:

Die Autoren danken der DFG für die Finanzierung der Forschungsprojekte im Rahmen von CRUSTWEATHERING (BE1780/44-1, BU666/19-1, KA899/32-1, LE903/14-1) im Schwerpunktprogramm 1803 "EarthShape: Earth Surface Shaping by Biota" sowie der chilenischen Forstbehörde (CONAF) für die Unterstützung im Feld. PJ dankt dem DFG Projekt „Grit Life" (JU 3228/1-1) und EFRE (84003265).

Literatur

[1] P. W. Rundel et al. (2007). Physical Geography of South America. In T.T. Veblen, K.R. Young, A.R. Orme (Eds.), Arid and semi-arid ecosystems. Oxford, UK: Oxford University Press, 158–183.

[2] P. Jung et al. (2020). Desert breath — How fog promotes a novel type of soil biocenosis, forming the coastal Atacama Desert's living skin. Geobiology 18, 113–124.

[3] J. Bahl et al. (2011). Ancient origins determine global biogeography of hot and cold desert cyanobacteria, Nature Communications 2:163.

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

[4] G. H. Schwabe (1960). Zur autotrophen Vegetation in ariden Böden. Blaualgen und Lebensraum IV. Österreichische Botanische Zeitschrift 107, 281–309.

[5] P. Jung et al. (2021). Emendation of the coccoid cyanobacterial genus *Gloeocapsopsis* and description of the new species *G. diffluens* sp. nov. and *G. dulcis* sp. nov. isolated from the Coastal Range of the Atacama Desert (Chile). Frontiers in Microbiology, https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.671742

[6] P. Jung et al. (2019). Ecophysiology and phylogeny of new terricolous and epiphytic chlorolichens in a fog oasis of the Atacama Desert. MicrobiologyOpen 8, e894.

[7] L. W. Lehnert et al. (2018). A case study on fog/low stratus occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a water source for biological soil crusts. Aerosol and Air Quality Research 18, 254–269.

[8] T. Fischer et al. (2013). Hydraulic properties of biological soil crusts on sand dunes studied by 13C-CP/MAS-NMR: A comparison between an arid and a temperate site. Catena, 155–160.

[9] A. Azua-Bustos et al. (2019). Aeolian transport of viable microbial life across the Atacama Desert, Chile: implications for Mars. Scientific Reports 9, 11024.

[10] P. Jung et al. (2020). Lichens bite the dust – a bioweathering scenario in the Atacama Desert. iScience 23, 101647.

[11] B. Büdel et al. (2004). Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. Geobiolology 2, 261–268.

[12] J. F. Banfield et al. (1999). Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96, 3404–3411.

Verfasst von:

Karen Baumann, geb. 1974, Biologiestudium an der Universität Hamburg, Promotion 2005 an der BTU Cottbus, Postdoc an der University of Adelaide (Australien) und am CNRS (BioEMCo, Frankreich). Seit 2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Bodenkunde der Universität Rostock.

Patrick Jung, geb. 1990, Bachelor in Biowissenschaften (2014), Master in Ökologie und mikrobieller Biodiversität (2016), Promotion 2019 an der TU Kaiserslautern. Aktuell wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Kaiserslautern und zukünftiger Bearbeiter des DFG geförderten ‚Grit Life'-Projekts.

Lukas W. Lehnert, geb. 1985, Studium der Geographie und Biologie an der Philipps-Universität Marburg, dort Promotion in Geographie 2015. Seit 2019 Professor für Physische Geographie und Umweltfernerkundung an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Elena Samolov, geb. 1984, Studium der Ökologie und Umweltwissenschaften (BSc, MSc) an der Universität Belgrad, Serbien. Zweiter Master in Umweltingenieurswesen an der Universität Belgrad, Serbien. Seit 2016 Doktorandin in der Abteilung Angewandte Ökologie und Phykologie der Universität Rostock mit einem Thema zur Biodiversität und Ökophysiologie von Grünalgen aus Bodenkrusten in Chile.

Christel Baum, geb. 1968, Studium der Pflanzenzüchtung und Saatgutproduktion an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberge, Promotion in Bodenkunde 1995, Habilitation 2004, seit 2020 apl. Professorin für Bodenbiologie an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Spezialgebiete: Boden-Pflanze-Interaktionen, Bodenmikrobiologie.

Jörg Bendix, geb. 1961, Studium der Geographie in Trier und Bonn, Promotion 1992, Habilitation 1998, seit 2000 Professor für Geoökologie an der Philipps-Universität Marburg. Spezialgebiete: Klimatologie, Klimaökologie und Fernerkundung.

Ulf Karsten, geb. 1960, Studium der Biologie in Bremen, Promotion 1990, Habilitation 1998, seit 2000 Professor für Angewandte Ökologie und Phykologie am Institut für Biowissenschaften der Universität Rostock. Spezialgebiet: Ökophysiologie und Biochemie von Algen extremer Lebensräume.

Burkhard Büdel, geb. 1953, Chemie- und Biologiestudium an der TU Darmstadt und Philipps-Universität Marburg, an letzterer auch Promotion (1986). Postdoc Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Habilitation (1993). Danach Heisenberg-Stipendiat (DFG), TU Darmstadt und Forschungsinstitut Senckenberg, Außenstelle Lochmühle (1994–1995). Professur an der Universität Rostock (1995–1997). Zuletzt Professur für Pflanzenökologie und Systematik an der TU Kaiserslautern (1997–2019). Seit dem 1. April 2019 im Ruhestand.

Peter Leinweber, geb. 1959, Studium der Pflanzenproduktion an der Universität Rostock, Promotion in Bodenkunde 1988, Habilitation 1995, seit 1998 Professor für Bodenkunde an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Spezialgebiete: Organische Bodensubstanzen, Phosphor im System Boden – Pflanze – Gewässer.

Korrespondenz
Dr. Karen Baumann
Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Bodenkunde
Julius-von-Liebig-Weg 6
18051 Rostock
Email: karen.baumann@uni-rostock.de

Dr. Patrick Jung
Hochschule Kaiserslautern
Angewandte Logistik- und Polymerwissenschaften
Carl-Schurz-Str. 10–16
66953 Pirmasens
www.selectedplants.de
Email: patrick_jung90@web.de

© 2022 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit
veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz