



Grenzregion zwischen Ägypten (links) sowie Gaza und Israel (rechts). Der Unterschied in den Schattierungen des Geländes in den nicht bebauten Gebieten spiegelt Veränderungen des Wüstenbodens auf der ägyptischen Seite wider. Die Grenze ist dadurch eine der wenigen, die sogar aus dem Weltraum sichtbar sind.

ALGENBLÜTE IM WÜSTENSAND

TEXT: KLAUS WILHELM

FOTO: SCIENCE PHOTO LIBRARY/PLANETOBSERVER

29

Trockenheit, Hitze, gleißende Sonne. Eine Wüste ist ein Lebensraum der Extreme. Wenn eine Pflanze hier überleben will, muss sie ganz schön was aushalten – erst recht, wenn sie eine Alge ist. Haim Treves untersucht zusammen mit Mark Stitt und seinem Team am Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie in Potsdam-Golm, wie sich die Alge *Chlorella ohadii* an die extremen Bedingungen der Wüste angepasst hat.

„Wir haben zunächst geglaubt, unsere Messgeräte seien kaputt. Aber es lag nicht an den Instrumenten, sondern an der Alge.“

HAIM TREVES

Chlorella ohadii ist eine einzellige Grünalge, benannt nach ihrem Entdecker, dem 2016 gestorbenen Biochemiker Itzhak Ohad, Treves' langjährigem Mentor und Freund. Ohad war der Erste, der *Chlorella ohadii* isolierte. Bei seinen Untersuchungen hat er fundamentale Erkenntnisse über die Fotosynthese gewonnen. Zehn Jahre ist es mittlerweile her, dass Haim Treves als Doktorand an der Hebrew University in Jerusalem regelmäßig in der Wüste unterwegs war. Von seinen Exkursionen in die israelische Negev brachte der junge Wissenschaftler Proben der hauchdünnen Sandkruste mit, die den Wüstenboden bedeckt. „Fern der Küste hat die Kruste die Konsistenz von Cornflakes. Sie zerbricht mit einem sanft-krachenden Geräusch, wenn man darauf tritt. An der Küste, wo die Luft feuchter ist, fühlt sie sich dagegen an, als trete man auf einen Schwamm“, beschreibt Treves.

Die Kruste erscheint völlig leblos, tatsächlich beherbergt sie jedoch eine einzigartige Lebensgemeinschaft aus Mikroorganismen. Zum Beispiel Cyanobakterien – früher als „Blualgen“ bezeichnete Bakterien, von denen viele Fotosynthese betreiben und ihre Energie aus dem Licht der Sonne erhalten. Diese Bakterien wollten

Treves und seine Kollegen im Labor aus der Sandkruste isolieren und züchten. Doch jedes Mal tauchten in den Zellkulturen nach kurzer Zeit winzige grüne Punkte auf. „Wir haben natürlich zuerst gedacht, wir hätten nicht sauber genug gearbeitet und unsere Proben verunreinigt“, erzählt der Biologe. Aber sie konnten die grünen Punkte einfach nicht loswerden. Schließlich überzeugte Itzhak Ohad Treves davon, der Sache auf den Grund zu gehen. Treves identifizierte die Punkte als Kolonien der Grünalge *Chlorella ohadii*. „Ich bin ihm wirklich zu großem Dank verpflichtet,

30

Cyanobakterien der Gattung *Leptolyngbya* bilden unverzweigte Ketten. Sie kommen in den unterschiedlichsten Lebensräumen vor, etwa in Thermalquellen, in der Antarktis oder in Wüsten. In der Negev-Wüste leben die Einzeller in der Kruste, die den Boden bedeckt.

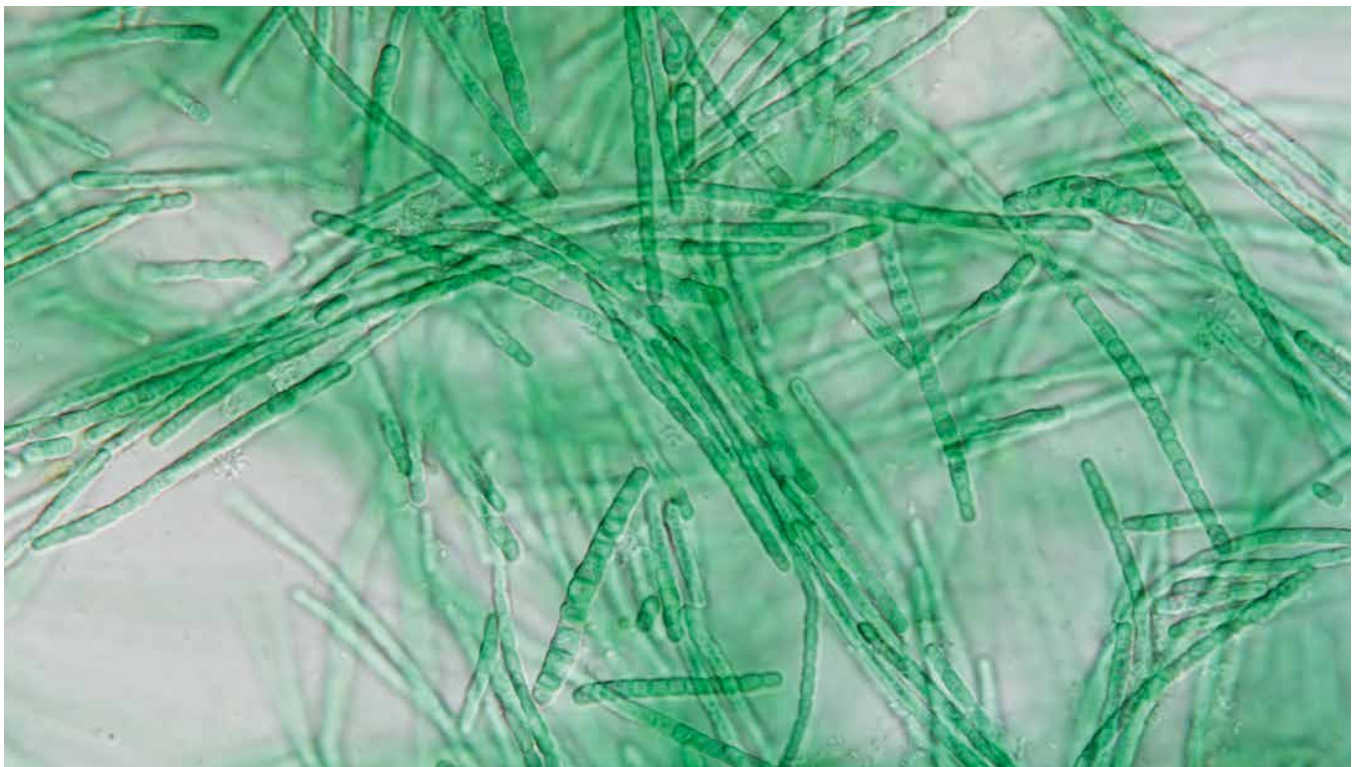


FOTO: CCALA



Grenze zwischen Israel (Vordergrund) und Ägypten. Während auf der israelischen Seite der Negev-Wüste im Frühling Blumen blühen, ist der ägyptische Teil weitgehend ohne Vegetation und von Sand bedeckt – eine Folge der Zerstörung der Bodenkruste durch Fahrzeuge und Überweidung.



Eine rund zwei Millimeter dünne Schicht bedeckt den Wüstenboden. Über viele Jahrzehnte hinweg haben Mikroorganismen Kohlenhydrate produziert, die mit dem Sand zu einer Cornflake-artigen Kruste verbacken sind. Diese speichert Wasser besser als reiner Sand und schützt den Boden vor Erosion und völliger Austrocknung.

und es macht mich sehr glücklich, dass sein Vermächtnis im Namen dieser Alge weiterlebt.“ Schnell erkannte Treves die ungewöhnlichen Fähigkeiten der Alge: Nicht nur, dass sie extremer Sonnenstrahlung mühelos trotzte – *Chlorella ohadii* wuchs sogar immer schneller, je mehr Licht die Forschenden auf sie einstrahlten. Selbst bei viermal so hoher Lichtintensität

wie in der Wüste wuchs der Einzeller weiter. „Wieder haben wir den Fehler bei uns vermutet und geglaubt, unsere Messgeräte seien kaputt“, berichtet Treves. „Aber es lag nicht an den Instrumenten, sondern an der Alge.“ *Chlorella ohadii* kommt nicht nur in einem der extremsten Lebensräume der Erde zurecht, sie ist auch einer der am schnellsten wachsenden Organismen überhaupt. Von der Entdeckung war auch Mark Stitt fasziniert. Der frühere Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie erforscht mithilfe modernster Technik die Fotosynthese. Er nutzt dafür wie die meisten seiner Kollegen Modellorganismen, zum Beispiel Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), Spinat, Kartoffel oder Tomate, denn das Erbgut dieser Pflanzen ist entschlüsselt, und viele ihrer Stoffwechselwege sind bekannt. „Manchmal lohnt es sich aber, vertrautes Terrain zu verlassen, denn durch die Fokussierung auf einige wenige Arten übersieht man leicht, wie unterschiedlich sich Pflanzen an die Umwelt anpassen können. Und gerade unter extremen Bedingun-

gen entwickeln Pflanzen immer wieder unerwartete Fähigkeiten“, sagt Mark Stitt. So war es nur folgerichtig, dass Haim Treves nach seiner Doktorarbeit an das Max-Planck-Institut in Golm wechselte, um *Chlorella ohadii* weiter zu erforschen.

Das Leben der Alge ist geprägt von Extremen: Tagsüber wird es bis zu 60 Grad heiß, Sonne und Hitze trocknen den Boden aus. Nachts wiederum kann es Frost geben. Im Morgengrauen schlägt sich die wenige Feuchtigkeit der Luft als Tau auf dem Boden nieder. Nur für kurze Zeit nach Sonnenaufgang gibt es deshalb gerade so viel Wasser und Licht, wie *Chlorella* braucht, bevor wieder von dem einen zu wenig und von dem anderen zu viel vorhanden ist.

Vor allem die Fotosynthese der Alge ist optimal an solche Bedingungen angepasst. Eine wichtige Rolle bei der Umwandlung der Energie der Sonne in chemische Energie spielen Elektronen. Jedes Photon, das von den Chlorophyllmolekülen absorbiert wird, hebt ein Elektron in einen höheren Energiezustand. Diese energiereichen Elektronen liefern die Energie, um Wasser in Sauerstoff und Wasserstoffatome zu „spalten“. In der Wüste ist die Strahlung jedoch zu stark. „Dann kommt es im Fotosyntheseapparat zu einer zerstörerischen Überladung, einer Art Kurzschluss“, erklärt Mark Stitt. Außerdem kann bei hoher Lichtintensität sogenannter Singulett-Sauerstoff entstehen – eine hochreaktive Form des Sauerstoffs, die den Fotosyntheseapparat schädigt.

Starke Sonneneinstrahlung führt ab einem bestimmten Punkt also nicht zu einer höheren Fotosynthese-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Grünalge *Chlorella ohadii* trotzt im Boden der Negev-Wüste extremer Trockenheit und Sonnenstrahlung. Gegen die grelle Sonne schützt sie ihren Fotosyntheseapparat mit verschiedenen Anpassungen. Vor dem Austrocknen bewahrt sie eine wenige Millimeter dünne Kruste auf der Bodenoberfläche. Bakterien bilden durch die Ausscheidung von Kohlenhydraten eine Gel-artige Schicht, die das Wasser besser speichern kann als Sand.

Forschende wollen die Eigenschaften der Alge auf Nutzpflanzen übertragen, damit diese auch bei hohen Strahlungsintensitäten effektiv Fotosynthese betreiben können.

Das Elektronenmikroskop enthüllt die Details des Fotosyntheseapparats von *Chlorella ohadii*. Einen großen Teil der Zelle füllt der Chloroplast aus. Seine aufeinandergestapelten Membranen (M) machen die Fotosynthese besonders effektiv. Dazu dient auch das sogenannte Pyrenoid (P). In ihm werden das für die Fotosynthese benötigte Kohlendioxid und ein Schlüsselenzym angereichert. Das Pyrenoid ist von einer Schicht aus Stärke umgeben (heller Ring).



500 nm

FOTO: HAIM TREVES/API FÜR MOLEKULARE PFLANZENPHYSIOLOGIE

32

leistung. Diese stagniert vielmehr, bei zunehmender Strahlung nimmt sie sogar ab. Trockenheit verstärkt den Effekt noch, weil das Kohlendioxid dann schlechter fixiert werden kann. Die Forschenden haben herausgefunden, dass *Chlorella ohadii* zum Schutz vor einem Kurzschluss verschiedene, zum Teils einzigartige Mechanismen entwickelt hat. So stellt die Alge sehr schnell ein Gleichgewicht zwischen Oxidations- und Reduktionsreaktionen her. Ohne dieses Gleichgewicht würden sich die Elektronen anhäufen. „Wie ein Auto, das in einen niedrigeren Gang schaltet, wenn es steil bergab geht, verhindert die Alge auf diese Weise Schäden am Fotosynthesesystem“, sagt Haim Treves. Bei *Chlorella* fließen die Elektronen während der Fotosynthese außerdem in einem geschlossenen Kreislauf, denn unter den Extrembedingungen der Wüste kann nur dadurch ein Überschuss an energiereichen Elektronen verhindert werden. Ansonsten würden die Elektronen wie Autos in einem Stau feststecken, einige gar zurückfließen. Außerdem produziert *Chlorella* Enzyme, die den zerstörerischen Singulett-Sauerstoff unschädlich machen.

Die Untersuchungen der Max-Planck-Forscher ergaben darüber hinaus, dass *Chlorella* bereits bei wenig Licht effektiv Fotosynthese betreiben kann. Die Alge verwendet dabei dieselben „Tricks“ wie für den Umgang

mit hohen Lichtintensitäten. Wenn die Sonneneinstrahlung steigt, kann sie so ihre Fotosyntheseleistung schnell erhöhen und 60-mal mehr Stärke produzieren als unter schwachem Licht. „Die Wachstumsrate der Alge steigt binnen Minuten – als ob ein Turbo eingeschaltet würde“, so Treves.

Aber all diese Anpassungen wären nicht genug, gäbe es in der Negev-Wüste nicht noch einen ganz besonderen Lebensraum, welcher der Alge zusammen mit Bakterien und Pilzen das Überleben unter widrigsten Bedingungen ermöglicht: die zwei Millimeter dicke

„Gerade unter extremen Bedingungen entwickeln Pflanzen immer wieder unerwartete Fähigkeiten.“

MARK STITT

Kruste auf dem Wüstenboden. Sie entsteht, wenn sich die Pioniere der Wüste auf der Oberfläche der Sandschicht ansiedeln, die Cyanobakterien. Über viele Jahre hinweg produzieren sie große Mengen Kohlenhydrate, die eine Gel-artige Masse bilden. Zusammen mit den Sandkörnern entsteht so im trockenen Zustand eine Kruste. Das Gel kann Wasser, das in Form von Tau oder – ganz selten – als Regen den Boden benetzt, besser speichern. Außerdem trocknet es langsamer aus als reiner Sand. So kann die Kruste den in ihr lebenden Mikroorganismen mehr Wasser zur Verfügung stellen. Erst wenn im Tagesverlauf mehr als die Hälfte des Wassers verdunstet ist, stellen die Mikroben ihre Aktivität vorübergehend ein. Dass die Kruste die Lebensgemeinschaft tatsächlich vor dem Vertrocknen bewahrt, konnte Haim Treves in Laborversuchen zeigen: Zusammen überleben Cyanobakterien und *Chlorella* die Trockenheit, wie sie für die Wüste typisch ist. Alleine dagegen stirbt die Alge. Forschende haben sogar Hinweise darauf gefunden, dass sich die Organismen der Kruste auf die tägliche Austrocknung vorbereiten: Schon vor Sonnenaufgang produzieren die Zellen Substanzen, die ihnen dabei helfen, in der folgenden Nacht aus dem Trockenzustand aufzuwachen.

Winzige Röhren in der Kruste

Treves' Mentor Itzhak Ohad und sein Team haben unter dem Mikroskop weitere faszinierende Phänomene beobachtet. So bilden die Cyanobakterien senkrechte Röhren, in denen sie zum Licht hin wandern können. „Wenn wir ein Stück Kruste im Labor in eine Petrischale legen und Wasser daraufsprühen, kommen die Bakterien an die Oberfläche und bilden dort eine grüne Schicht. Ein andermal erscheint die Kruste schwarz, wenn sich die Bakterien mit eigens produzierten Sonnenschutzfaktoren abschirmen“, erklärt Haim Treves. Von diesem Lichtschutz profitieren auch *Chlorella* und die anderen Mikroorganismen der Kruste. Ohne die Cyanobakterien könnte die Alge also

ANPASSUNGEN VON PFLANZEN AN DIE WÜSTE

WURZELN

Bildung tief reichender oder weiträumiger Wurzeln

WASSER SPAREN

Undurchlässige Oberfläche (z.B. Wachsschicht)

Geschlossene Spaltöffnungen während des Tages

Weniger oder kleinere Spaltöffnungen

Kleinere oder gar keine Blätter

Haare als Licht- und Verdunstungsschutz

SONNENSCHUTZ

C4-Fotosynthese: Nächtliche CO₂-Fixierung in Form von Malat und Umwandlung in Kohlenhydrate tagsüber

Produktion von Sonnenschutzfaktoren, etwa Aloe

Abwenden vom Licht

VERBREITUNG

„Schlafende“ Samen, die bei Trockenheit erst nach Jahren keimen

Explosives Wachstum der Keimlinge bei Feuchtigkeit

nicht überleben. Überhaupt scheinen die Bakterien die heimlichen Herrscher dieses Ökosystems zu sein. Sind nämlich die Ressourcen einmal besonders knapp, so können sie das Wachstum der Algen sogar komplett stoppen.

Wie wichtig die ökologische Funktion der Bodenkruste ist, sieht man an der israelisch-ägyptischen Grenze. Auf der ägyptischen Seite dominieren Reifenspuren sowie andere Anzeichen menschlichen Einflusses das Bild. Da die Kruste weitgehend zerstört ist, konnte sich auf dieser Seite der Grenze eine Sandwüste ausbreiten. Die israelische Negev dagegen ist militärisches Sperrgebiet und darf von Unbefugten nicht betreten werden. Die Kruste ist aus diesem Grund größtenteils noch intakt. Was das bedeutet, zeigt sich nach den seltenen Regenfällen in der Wüste: Die ägyptische Negev bleibt braun, die israelische hingegen blüht auf und wird für kurze Zeit zum Blütenmeer. „Die Kruste verhindert die Ausbreitung des Sandes. So können dort nach dem Regen Pflanzen gedeihen“, erklärt Treves.

Die chinesische Regierung hat die stabilisierende Wirkung der Kruste auf Sanddünen und auf die Bodenfruchtbarkeit erkannt. Forschende des Landes haben Dünen mit Cyanobakterien geimpft und künstlich bewässert. Auf diese Weise sollen sich eine Sandkruste und schließlich landwirtschaftlich nutzbarer Boden bilden. Ob solche Maßnahmen erfolgreich sein werden, muss sich noch zeigen. Haim Treves verfolgt einen anderen Ansatz, damit

Nutzpflanzen in trockenen und halbtrockenen Regionen besser wachsen. Seiner Ansicht nach ist *Chlorella ohadii* selbst der Schlüssel: „Wenn wir verstehen, was sie so widerstandsfähig gegenüber Trockenheit und hoher Strahlung macht und wie diese Alge so rasant wachsen kann, können wir auch andere Pflanzen mit solchen Fähigkeiten ausstatten“, meint Treves. Vielleicht besitzt die winzige Grünalge also einen Schlüssel für das Leben auf einer sich erhaltenden Erde. Es wäre nicht das erste Mal, dass sich ein vermeintlicher Messfehler im Nachhinein als eine wichtige wissenschaftliche Entdeckung herausgestellt hätte.

www.mpg.de/podcasts/extreme