

œK

ÄRZTINNEN
UND ÄRZTE FÜR
UMWELTSCHUTZ
MEDECINS EN FAVEUR DE
L'ENVIRONNEMENT
MEDICI PER
L'AMBIENTE



SKOP

2/26



Mikrobiom

Was Mensch und Umwelt zusammenhält



Basel-Stadt räumt Benzidinbelastung ein
AefU erzielt Etappensieg beim Chemieareal Klybeck



40 geplante Starlink-Antennen in Leuk VS
Ein Verein kämpft für Schutz und Vorsorge

Editorial	3
Etappensieg: Basel-Stadt räumt Benzidinverschmutzung ein Dr. Martin Forter, AefU	4
Satellitenstrahlung: Leuker Verein verlangt Vorsorge Dr. med. Roman Kuonen et al., Verein «Schutz vor Satellitenstrahlung Region Leuk»	7
Das Mikrobiom zwischen Umwelt, Ernährung und Gesundheit Dr. med. Sabine Heselhaus, Ernährungsforum Stadt Land, Luzern	9
Essbares Pflanzenmikrobiom Prof. Dr. Gabriele Berg, Technische Universität Graz (A)	12
Mikrobiomforschung und Ökolandbau Dr. Natacha Bodenhausen und Dr. Pascal Herren, FiBL, Frick AG	15
Gefährden Pflanzenschutzmittel die Bodengesundheit? Dr. Elias Barmettler und Prof. Dr. Marcel van der Heijden, Uni Zürich/Agroscope	17
Mikroben in tauendem Eis und Permafrost Dr. Beat Frey, WSL, Birmensdorf ZH	20
Bestellen: Terminkärtchen und Rezeptblätter	23
Die Letzte	24

19. Juni 2026

Titelbild:

Der Pilz *Pseudogymnoascus verrucosus* auf Nährboden.

© Rahel Oberhummer



Künftig gut Kirschen essen mit dem Klima. Dein Legat hilft.



Die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) lassen nicht locker – für heutige und kommende Generationen.

Dein Legat hilft, die Gesundheit von Menschen und Umwelt auch in Zukunft zu schützen. AefU-Präsident Dr. med. Bernhard Aufderreggen informiert Dich gerne.

079 639 00 40

bernhard.aufderreggen@aefu.ch
www.aefu.ch/legat

Liebe Leserin

Lieber Leser

Wir sind nie allein. Wir leben in mehr oder weniger guter Gesellschaft mit unseren mikrobiellen Gemeinschaften. Ihr Zustand entscheidet mit, wie gesund oder krank wir sind. Und wir beeinflussen dies mit unserer Ernährung, deren Qualität wiederum von der Produktionsform abhängt. Diese Verkettung verlangt, dass Ärzt:innen in der Ausbildung mehr über das Mikrobiom erfahren und den Patient:innen in der ärztlichen Praxis vermitteln, wie das äussere und innere Ökosystem zusammenhängen (Beitrag Heselhaus, S. 9).

Mit der Nahrung verleiben wir uns auch ihre Mikroben ein. Die Entdeckung des «essbaren Mikrobioms» hat das Verständnis von gesunden Lebensmitteln weit über den Horizont von Nährwert und Inhaltsstoffen hinaus revolutioniert (Beitrag Berg, S. 12).

Wie unsere Gesundheit von einem intakten Darmmikrobiom profitiert, halten Mikroben im und aus dem Boden die (Nutz-)Pflanzen wohlgenährt und fit. Nun könnte man bequem darauf verfallen, den Acker mikrobiell zu düngen – und bringt damit allenfalls das «ansässige» Mikrobiom aus dem Gleichgewicht. Der Ökolandbau will die Wechselwirkungen ganzheitlich verstehen (Beitrag Bodenhausen und Herren, S. 15).

Das ist auch dringend nötig. Denn es steht schlecht um das Bodenmikrobiom. Die negativen Effekte der chemisch-synthetischen Pestizide auf die Biodiversität von Pflanzen und Tieren sind unbestritten. Doch ausgerechnet die Auswirkungen auf das mikrobielle Bodenleben sind kaum erforscht. Jedenfalls scheinen die unverzichtbaren Mykorrhizapilze besonders betroffen (Beitrag Barmettler und van der Heijden, S. 17).

Der Lebensraum eines besonders kälteresistenten Mikrobioms ist im Begriff davon zu rinnen. Mit der Permafrost- und Gletscherschmelze gehen diese Mikroorganismen verlustig, bevor wir ihre Eigenschaften kennen. Sie zu «ernten» und in der Biobank (wieder-) einzufrieren scheint derzeit die einzige Möglichkeit, sie in ihrer Vielfalt und allenfalls als Ressource für die Zukunft zu bewahren (Beitrag Frey, S. 20).

Das Heft beginnt jedoch mit Problemen aus der Vergangenheit: Auf dem stillgelegten Basler Chemieareal Klybeck soll ein neuer Stadtteil entstehen. Seit Jahren warnen die AefU vor dem schlecht untersuchten chemischen Risiko für die zukünftigen Bewohner:innen. Nun erzielen wir dank unserem langen Atem und der intensiven Recherchearbeit einen Etappensieg (Beitrag Forter, S. 4).

Und wir geben dem Verein «Schutz vor Satellitenstrahlung Region Leuk» das Wort. Ihm stehen mit einer Hausärztin und einem Hausarzt zwei AefU-Mitglieder vor. Ihre Sorge gilt der intransparenten Strahlenbelastung durch 40 geplante Starlink-Satellitenantennen für die Firma SpaceX von Elon Musk (Beitrag Kuonen, Schnyder-Etienne und Schmidt, S. 7).

Wir wünschen Ihnen gute Lektüre.



Stephanie Fuchs, leitende Redaktorin

PS: Füttern Sie nicht nur den Kopf mit anregendem Lesestoff, geben Sie auch ihrem Darmmikrobiom gute Futterqualität.



Basel-Stadt räumt Benzidinverschmutzung ein – Etappensieg für die AefU

Martin Forter,
Geschäftsleiter AefU

Jahrelang bestritten die Basler Behörden die AefU-Warnung. Jetzt ist klar: Das gefährliche Benzidin überschreitet auf dem Chemieareal Klybeck die Grenzwerte. Dort soll ein neuer Stadtteil entstehen.

Auf dem stillgelegten Werkgelände Klybeck von BASF und Novartis – einer der grössten Industriebrachen der Schweiz – sollen künftig 8500 Menschen wohnen und 7500 Arbeitsplätze, Kitas, Schulen, Freizeitanlagen sowie Grünflächen entstehen.

Der Boden aber ist nach 150 Jahren Chemieproduktion stark belastet. Auch mit Benzidin. Die Substanz erzeugt beim Menschen Blasenkrebs.

Druck bringt Durchbruch

Der langjährige Druck der AefU auf Behörden und Investoren führte nun zu einem Durchbruch.

Im April 2026 mussten die mittlerweile neuen Arealeigentümer – die Immobilienfirmen Rhystadt und Swiss Life – sowie das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt (AUE) einräumen: Im Grundwasser beim ehemaligen Chemiegelände liegen Benzidin und andere Benzidinverbindungen über der zulässigen Konzentration.

Damit sind auf weiten Teilen des Geländes umfangreiche Sanierungsarbeiten nötig, bevor das geplante Wohnquartier gebaut werden kann. Das bestätigte das AUE gegenüber den Medien.

Somit bewahrheitet sich, wovor die AefU gestützt auf eigene Recherchen und Gutachten seit sieben Jahren gewarnt haben: Schaut man beim Chemieareal Klybeck genau hin, dürften massive Verschmutzungen mit Benzidin und anderen Schadstoffen zum Vorschein kommen. Genau das zeigen nun die Analysen der Grundeigentümer.

Kritische Stoffe erst nach AefU-Recherchen im Fokus

Ohne die Interventionen der AefU hätten diese Benzidin-Untersuchungen kaum stattgefunden. Der Altlasten- und Schadstoffexperte Gerd Rippen erstellte im Auftrag der Basler Denkmalpflege ein Gutachten zu einer allfälligen Umnutzung einer Farbstofffabrik auf dem Gelände. In seinem Bericht schreibt er: «Das Fehlen der aus toxikologischer Sicht wichtigsten Stoffe» hänge «auch damit zusammen, dass die historische Erkundung» des Chemiegeländes Klybeck «offensichtlich ausgesprochen lückenhaft erfolgt» sei. «Wesentliche Ausgangsstoffe, Zwischen- und Endprodukte der Azofarben-Herstellung» seien erst durch Recherchen der AefU «offenkundig» geworden. «Erkenntnisse daraus» seien «erst nachträglich in gebäudebezogene Berichte» aufgenommen worden.¹

So auch Benzidin: Fünf Monate nach Erscheinen der AefU-Studie² zum Ultragift, nehmen die Grundstückseigner Rhystadt und Swiss Life im Juli 2023 Grundwasserproben, um diese erstmals auch auf Benzidin zu untersuchen.

Benzidin auf dem ganzen Gelände

Der historische Bericht von Ciba SC (heute BASF) und Novartis aus dem Jahr 2000 ging auf ihrem Werkgelände von einer räumlich eng begrenzten «Verdachtszone» mit Benzidin-Risiko aus. Die Annahme war falsch. Die neuen Grundwasseranalysen der Grundeigentümer weisen auf eine grossflächige Verseuchung mit Ben-

zidin und anderen Benzidinverbindungen hin. Und dies sogar ohne Einbezug von «N,N,N',N'-Tetramethylbenzidin», das schon 2003 in extrem hohen Konzentrationen nachgewiesen, aber bis heute ignoriert wurde (vgl. Kasten und Karte S. 6).

Selbst diese neuen Analysen dürften also nicht das ganze Ausmass der Verschmutzung zeigen. Umso weniger, als das Messnetz lückenhaft und deshalb ungeeignet erscheint, die Grundwasserbelastung repräsentativ zu erfassen. Das AUE erachtet die Dichte als ordnungsgemäss. Aus unserer Sicht bräuchte es jedoch ein engeres Netz für belastbare Erkenntnisse.

Sie pflanzen, als gäbe es kein Chemierisiko

Ein solches fachlich korrektes Vorgehen fordern wir bereits seit 2017. Wir zeigten uns schon damals besorgt über die Nonchalance bei der Planung des neuen Wohnquartiers. Die chemische Verschmutzung des Chemiegeländes und damit das Risiko, dass die Giftstoffe der-einst die Gesundheit der Bewohner:innen gefährden könnten, spielte dabei praktisch keine Rolle. Die Konzerne BASF und Novartis als damalige Arealeigentümer und der Kanton Basel-Stadt pflanzen, als ob sie auf einer grünen Wiese bauen würden.

Da war die Rede von Wasserläufen, die das Quartier durchfliessen werden, von einem Badesee und von Chemiegebäuden, in denen Wohnungen entstehen sollen.



Stillgelegtes Chemieareal Klybeck vom Grossbasler Rheinufer her gesehen.

© OEKOSKOP

Es ist aber die Verschmutzung des Untergrundes und der Chemiegebäude, bzw. ihr Zustand nach der Sanierung, der über die Nutzungsmöglichkeiten entscheidet. Wir forderten dezidiert: Zuerst sanieren, dann planen und allenfalls bauen.³ Darauf aber wollte damals in Basel niemand hören.

Die falschen Schadstoffe gesucht

BASF und Novartis, bzw. ihre Vorgängerfirmen, hatten im Werkareal Klybeck mit rund 2000 verschiedenen Chemikalien hantiert, so auch mit dem hochtoxischen Benzidin. Mit Billigung des AUE berücksichtigten die beiden Konzerne bei ihren damaligen Untersuchungen jedoch meist nur jene Substanzen, die in der Altlastenverordnung (AltIV) mitsamt Grenzwert aufgelistet sind. Nicht aber Benzidin. Das zeigten wir 2019 mit einem AefU-Gutachten.

Die gelisteten Substanzen der AltIV wurden im Klybeck jedoch mehrheitlich weder produziert noch verarbeitet. Industrie und Behörde suchten also nach den falschen Schadstoffen. Somit ist das Che-

miegelände Klybeck schlecht untersucht und die Vorgaben der AltIV sind nicht erfüllt. Denn für vorhandene Schadstoffe ohne Grenzwert muss ein solcher hergeleitet werden.⁴

Das AUE wies die Kritik der AefU vehement zurück. Amtsleiter Matthias Nabholz behauptete sogar: «Das Klybeck-Areal ist eines der bestuntersuchten Areale der ganzen Schweiz.»⁵

61 Schadstoffe nicht beachtet

Das Analyseprogramm der neuen Untersuchung durch die Grundstückseigner Rhystadt und Swiss Life kann die Kontamination des Grundwassers beim Chemiegelände Klybeck nicht genügend erfassen. Das ist das Fazit einer neuen AefU-Studie vom März 2026.⁶ Denn im Analyseprogramm fehlen 61 potenziell krebserregende, erbgutverändernde oder explosive Substanzen, obwohl sie auf dem Areal in grossen Mengen verarbeitet und zum Teil bereits in hohen Konzentrationen nachgewiesen wurden.

Zum Beispiel:

- N,N,N',N'-Tetramethylbenzidin: 2003 fand man es im Areal 2 in einer Konzentration von 10 bis 50 Milligramm pro Kilo Bodenmaterial. Das ist enorm viel. Trotzdem wurde die Substanz bis heute ignoriert. Der

provisorische Grenzwert liegt entsprechend der hohen Toxizität bei bloss 0.000003 Milligramm pro Liter Grundwasser. Es ist also sehr wahrscheinlich, dass der Schadstoff das nur wenig tiefer fliessende Grundwasser unzulässig verschmutzt.

- Dimethylformamid (DMF): Diese Substanz gilt als wahrscheinlich krebserregend und kann das Kind im Mutterleib schädigen. Die Vorgängerfirmen von BASF und Novartis setzten DMF auf dem Klybeckareal in mindestens zehn Fabriken in grossen Mengen ein. Bei neun dieser Bauten war das Abwasserrohr leck. DMF dürfte somit das Grundwasser und den Untergrund kontaminieren.

Trotzdem fehlen auch diese beiden Schadstoffe im Analyseprogramm.

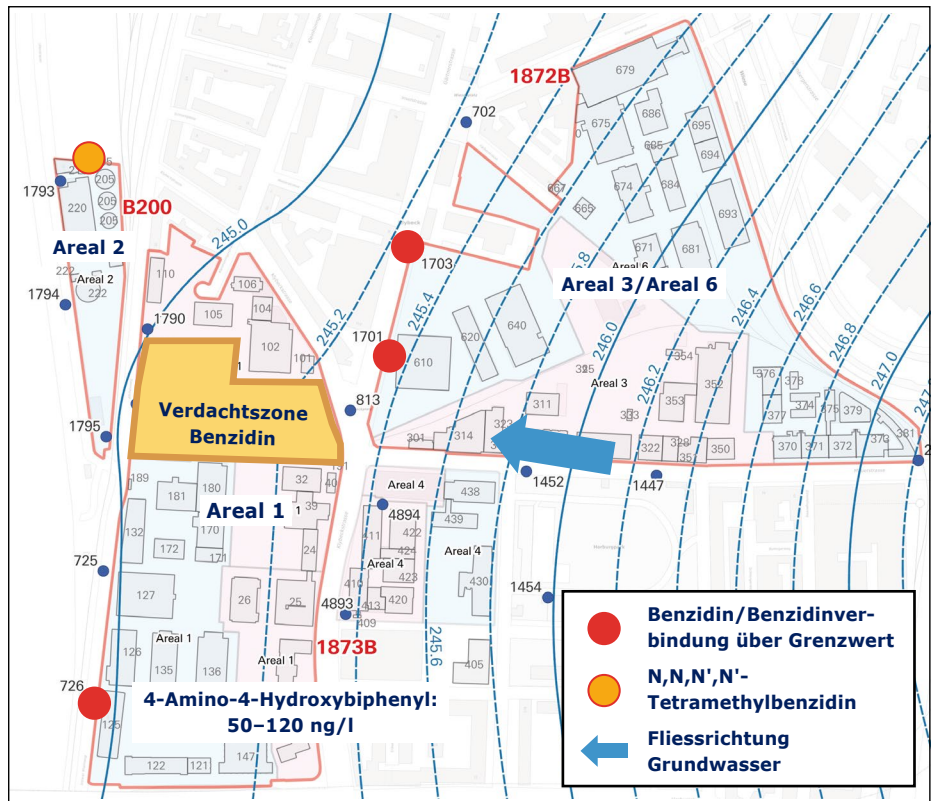
Nicht bei der Verdachtszone (gelb), wie im Historischen Bericht aus dem Jahr 2000 postuliert, sondern fast auf dem ganzen Chemiegelände Klybeck liegen Benzidin, Benzidin-Verbindungen und deren Abbauprodukte über dem Grenzwert. Die Messungen bei den roten Punkten repräsentieren die Verschmutzung des jeweiligen Einzugsgebietes.

Karte: Geotechnisches Institut, 2026;
Bearbeitung: OEKOSKOP

Wallis topp, Basel-Stadt floppt

Diese Behauptung widerlegten die AefU im März 2023 mit einer weiteren Studie.² Wir verglichen am Beispiel Benzidin das Vorgehen der Kantone Wallis, Basel-Landschaft und Basel-Stadt bei den Chemieanlagen von BASF, Novartis bzw. Syngenta auf ihrem Kantonsgebiet. Das Wallis war beim Fabrikgelände Monthey vorbildlich. Die Behörden von Basel-Stadt dagegen flopten beim Klybeckareal mit ihrem unkoordinierten Vorgehen und den lückenhaften Standortuntersuchungen, insbesondere auf Benzidin. Die AefU bekräftigen ihre Kritik: das Klybeck ist schlecht untersucht. Und wir betonen: Benzidin und Wohnen, das geht gar nicht.²

Die «Vorwürfe» der AefU seien «haltlos», «nicht neu» und «auch nicht korrekt», liess daraufhin das Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt unter Regierungsrat Kaspar Sutter (SP) verlauten. Und behauptete einmal mehr, das Chemiegelände Klybeck sei gut untersucht.⁷ Dem widerspricht 2024 auch der Altlastenexperte Gerd Rippen im Interview mit OEKOSKOP. Aus seiner Sicht seien im



Klybeck das Grundwasser, der Untergrund, die Porenluft des Bodens sowie die Innenraumluft der Fabrikbauten ungenügend untersucht.⁸

Endlich systematisch vorgehen

Soll auf dem Chemieareal Klybeck ein neuer Stadtteil weitgehend ohne Chemierisiken entstehen, dann ist ein systematisches Vorgehen zwingend. Dazu braucht es zuerst endlich vertiefte historische Studien, wo genau mit welchen Substanzen in welchen Mengen gearbeitet wurde.

Menge und Giftigkeit der Substanzen sind zu gewichten und ein entsprechendes Analyseprogramm zu erstellen. Die Verschmutzung von Grundwasser und Untergrund ist mit Bohrungen in einem engen Raster (Abstand 10 Meter) zu erfassen und dann zu beseitigen.

Denn wer möchte eine Wohnung mieten oder kaufen, wenn ringsum im Boden Gifte unbekannter Zusammensetzung liegen und somit auch die Gesundheitsgefahren unklar sind? Welche Bank würde dafür eine Hypothek vergeben?

Benzidin in Baselland und Tessin

Novartis fand 2024 im Grundwasser ihres Chemiegeländes in Schweizerhalle BL Benzidin und Benzidinverbindungen über der erlaubten Konzentration. Bis 2023 war Benzidin auch im Baselbiet kein Thema.² Danach aber gingen die Behörden das Ultragift offensiv an.

Das tat Novartis offensichtlich auch im Tessin. Der Konzern untersuchte nach Erscheinen der AefU-Studie von 2023 das Grundwasser bei seiner Tochter Pharmaanalytica SA am Standort Locarno ebenfalls auf Benzidin und Benzidinverbindungen. Das

weiss OEKOSKOP aus zwei unabhängigen Quellen.

Offensichtlich wurde der Konzern fündig, denn 2025 bewilligte das Bundesamt für Umwelt die dafür gemäss Altlastenverordnung herzuleitenden Grenzwerte. Der Konzern bestätigt weder einen Benzidin-Fund noch eine Grenzwertüberschreitung. Er schreibt OEKOSKOP bloss, er habe den Betrieb der Pharmaanalytica 2023 eingestellt und arbeite «eng gemäss den geltenden Anforderungen mit den lokalen Behörden zusammen».

Dr. Martin Forter ist Altlastenexperte und seit 2011 Geschäftsleiter der AefU.

info@aefu.ch

www.aefu.ch > Themen > Chemikalien > BASF & Novartis – Chemieareal «Klybeck»

¹ Gerd Rippen. Schadstoffgutachten-Beurteilung Klybeck-Areal CIBA Bau 90, Göttingen, 19.12.2023, S. 20.

² www.aefu.ch/benzidin-studie

³ www.aefu.ch/sanieren-dann-planen

⁴ www.aefu.ch/gutachten-Klybeck

⁵ Radio SRF, Regionaljournal Basel, 20.6.2019, 17h30.

⁶ www.aefu.ch/klybeck-analyseprogramm

⁷ Medienmitteilung WSU, 6.3.2023.

⁸ www.aefu.ch/oekoskop_24_4

Leuker Verein verlangt Vorsorge

– die Behörden wiegeln ab

Roman Kuonen, Hanna Schnyder-Etienne
und Yvonne Schmidt, Verein «Schutz
vor Satellitenstrahlung Region Leuk»

Die Firma SpaceX von Elon Musk plant ein weltweites Satellitennetzwerk. Die grösste Bodenstation in Europa mit 40 Starlink-Antennen soll in Leuk VS entstehen. Die gesundheitlichen Folgen sind ungeklärt.

Die Antennen kämen mitten im Siedlungsgebiet und im Naturpark Pfyn-Finges zu stehen. Sie werden im Vergleich zu üblichen Mobilfunkbasisstationen und den bereits vorhandenen Satellitenantennen mit erheblich mehr Leistung senden und dies in einem viel höheren Frequenzbereich (Millimeterwellen, 25-30 Gigahertz).

Als langjährige Hausärzte in Leuk sind wir (Drs. med. H. Schnyder-Etienne und R. Kuonen) der Gesundheit und der Vorsorge verpflichtet. Eine Übersichtsstudie der WHO von 2025 zeigt hohe Evidenz, dass Mobilfunkstrahlung im Tierversuch Krebs verursachen kann, dies auch unterhalb der schweizerischen Grenzwerte.

Die zuständige EU-Kommission fordert die Staaten daher auf, die hochfrequenten elektromagnetischen Strahlen zum Schutze der Bevölkerung möglichst tief zu halten.

Versuchskonzession trotz Blackbox?

Im Juni 2025 erfuhren wir vom überdimensionierten Bauprojekt. Mit vielen besorgten Menschen erhoben wir noch im gleichen Monat Einsprache dagegen, wegen Strahlenrisiken, gesundheitlicher Ge-

fährdung und politischer Brisanz. Ende November 2025 erteilte die Gemeinde Leuk die Baubewilligung und wies unseren Einspruch ab. Sie verwies auf die bereits gesprochene Versuchskonzession durch das Bundesamt für Kommunikation (Bakom) und die positive Vermeidung der kantonalen Stellen.

Weder unsere Argumentation noch die Umweltschutzgesetzgebung und damit der Schutz der Bevölkerung wurden erwogen. Ende Dezember 2025 legten wir beim Walliser Staatsrat Beschwerde gegen die Baubewilligung ein. Erst einen Tag vor Ablauf der Beschwerdefrist erhielten wir endlich Einsicht in den technischen Bericht der Firma SpaceX in der deutschen Übersetzung. Die Tabelle über unbeabsichtigte Strahlung war zu einem Drittel geschwärzt, was ihre Interpretation verunmöglichte. Wurde dies von den Instanzen so akzeptiert? Gibt das Bakom eine Versuchskonzession trotz geschwärzter Tabelle? Was soll hier verborgen werden? Und wer hat dies warum vertuscht?

Weitere Ungereimtheiten

Aus physikalischen Gründen gibt es bei Antennen immer eine Streustrahlung.

Nach wie vor existiert jedoch kein Antennendiagramm zur Beurteilung der gesamten Strahlenbelastung. Es existiert nur die Berechnung der Strahlenbelastung durch eine einzelne Antenne, nicht durch alle 40. Gibt es kumulative Effekte, Interferenzen usw.? Das Fehlen solcher Daten ist in der Schweiz gesetzeswidrig.

Im Rahmen des juristischen Verfahrens hatten wir das Recht auf Stellungnahme und Akteneinsicht. Dabei fanden wir Anfang Mai 2026 die englische Originalfassung des technischen Berichtes. Hier ist die besagte Tabelle ungeschwärzt. Wir müssen diese Daten erst noch auswerten und interpretieren.

Ungeschützt im Uplink

Die Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM) wird 2026/2027 in einer Studie die Satellitenstrahlung vom Weltraum auf die Erde und zu den Endgeräten (Downlink) untersuchen.¹ Aus gesicherten Quellen erfuhren wir jedoch, dass der Uplink das grösste Strahlenproblem verursacht. Die FMS-Studie misst also eigentlich das Falsche. Jede Starlink-Antenne ist beweglich und überträgt die Daten mit sehr viel mehr Leistung und höherer Frequenz zu den Satelliten im Weltraum als die bisherigen Satellitenantennen. Und dies 40-fach bei 40 Antennen.

Die einzelnen Antennen strahlen in einem Abstrahlwinkel von 140 Grad rund um ihren Standort. Da Leuk im steilen Berggebiet liegt, bedeutet dies flache Winkel ab 20 Grad über der Horizontalen. So werden auch Menschen in ihren Dörfern, Tiere und die ganze Umgebung oberhalb

Digital unabhängig von den USA

Unser Verein «Schutz vor Satellitenstrahlung Region Leuk» empfiehlt Alternativen für die digitale Unabhängigkeit von alltäglich genutzten US-amerikanischen Programmen. Für mehr Sicherheit, mehr Pri-

vatsphäre und das gute Gefühl, Zuckerberg und Co. nicht mehr zu unterstützen. Ausprobieren, benützen und weiterempfehlen! <https://schutzvorsatellitenstrahlungregion-leuk.ch/de/aktuell.html>



Einzelne der heutigen Antennen werden demontiert (eine Antenne wurde bereits im Mai 2026 abgebaut). Anstelle sollen 40 Starlink-Antennen platziert werden.

der Anlage dauernd bestrahlt. Und ohne dass dafür eine Strahlenmessung geplant wäre. Diesbezüglich wurden keine Abklärungen getroffen, obwohl der Bundesrat anfangs Mai 2026 beschwichtigte, die zuständigen Walliser Behörden hätten dies geprüft. Wir erkennen keinen Bevölkerungsschutz bei dieser Anlage in privaten Händen. Ohne Messung der Strahlenbelastung in den Dörfern werden wir Bewohner:innen zu Versuchskaninchen.

Ausserdem ist unbekannt, welche Auswirkungen auf Gleitschirmpiloten im Strahlungskegel bestehen.

Schutz der Natur und Umwelt

Auch eine Gefährdung von Natur und Umwelt ist durch die Strahlung der Satellitenantennen nicht auszuschliessen.

In der Luft sind besonders Vögel und Insekten (inklusive das Aeroplankton) betroffen. Unabhängige Forschung belegt, dass deren Gesundheit und Orientierungssinn leidet. Somit können Zugvögel in Gefahr geraten. Und dies im Naturpark mit der grössten Vogelvielfalt der Schweiz.

Ökologische und geopolitische Perspektive

Die geplante Anlage würde sehr viel Strom verbrauchen. Der Bedarf entspricht

dem jährlichen Verbrauch von rund 400 durchschnittlichen Einfamilienhäusern. Zusätzlich geplante Rechenzentren konsumieren ebenfalls grosse Mengen Strom und Kühlwasser. Bei bewaffneten Konflikten könnte Leuk als Standort dieser strategisch wichtigen Bodenstation ins Visier geraten. Ebenso könnte dieses Satelliteninternet mit einem Knopfdruck in den USA unterbrochen werden. Ausserdem haben die Schweizer Behörden kein Rechtsanspruch auf Zugang und Kontrolle der Daten in diesem privaten Satellitennetzwerk. Doch die Schweiz muss ihre Datensouveränität behalten und kontrollieren können. Diese geo- und neutralitätspolitischen Aspekte bedürfen einer Klärung in einem demokratischen Prozess.

Unserer Forderungen

Wir brauchen kein Satelliteninternet mit hochfrequenter Strahlung und unbekannten Folgen. Nebst dem Mobilfunk ist das Glasfasernetz die schnellste, nicht strahlende, energiearme und sicherste Internetverbindung der Schweiz.

Das im Umweltrecht verankerte Vorsorgeprinzip muss gewährt sein. Die sorgfältige Risikoabwägung bei so viel Nichtwissen ist dringend.

Daraus folgt für uns:

- Keine Starlink-Satellitenantennen in Leuk
- Unabhängige Forschung zur Strahlungsbelastung (forschen vor bauen)
- Eine national geführte politische Diskussion zum Thema

Unser Verein setzt sich ein für die Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt im Sinne von One Health und für die Demokratie. Jede Unterstützung freut uns. ■

Die **Dres. med. Roman Kuonen** und **Hanna Schnyder-Etienne** sind Co-Präsident und -Präsidentin, Gesundheitsfachfrau **Yvonne Schmidt** ist Vorstandsmitglied des Vereins «Schutz vor Satellitenstrahlung Region Leuk» mit Sitz in Susten VS.

schutz.strahlung.leuk@bluewin.ch
www.schutzvoersatellitenstrahlung-regionleuk.ch

¹ Die FMS hat ihren Sitz an der ETH Zürich. Sie wird durch die Mobilfunkindustrie finanziert. Unser Verein betrachtet sie als nicht unabhängig.

Das Mikrobiom als Bindeglied zwischen Umwelt, Ernährung und Gesundheit

Sabine Heselhaus,
Ernährungsforum Stadt Land, Luzern

Das menschliche Mikrobiom entwickelte sich in knapp zwei Jahrzehnten von einer marginalen Forschungsfrage zu einem Paradigma der Medizin und von Public Health. Es impliziert unser ärztliches Handeln.

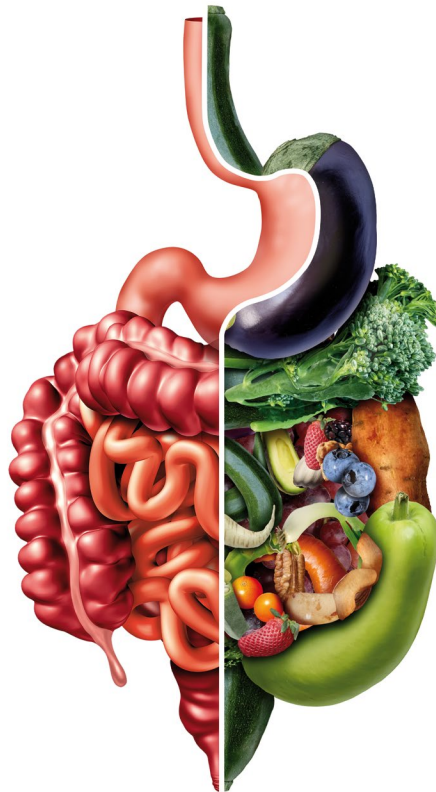
Der menschliche Körper ist heute nicht mehr adäquat als isoliertes Organ-System zu verstehen, sondern als komplexes Meta-Ökosystem, das von der Gesamtheit seiner mikrobiellen Gemeinschaften wesentlich mitgestaltet wird.

Im Fokus steht dabei insbesondere das Darmmikrobiom, dessen Zusammensetzung und funktionelle Kapazität in enger Wechselwirkung mit metabolischen, immunologischen und kardiovaskulären Prozessen steht.

Grosse metagenomische Studien zeigen konsistent, dass spezifische mikrobielle Profile mit Parametern wie Glukosetoleranz, Lipidprofil, systemischer Entzündung und kardiovaskulärem Risiko korrelieren. Entscheidend ist dabei weniger die Präsenz einzelner Mikroorganismen als die Diversität und funktionelle Breite des gesamten mikrobiellen Systems.

Ein diverses Mikrobiom ist metabolisch flexibler, resilienter gegenüber exogenen Störungen und in höherem Masse zur Produktion entzündungshemmender Metabolite wie kurzkettiger Fettsäuren (SCFA) befähigt.

Demgegenüber steht ein reduziertes oder aus dem Gleichgewicht geratenes Mikrobiom in systematischem Zusammenhang mit Adipositas, Typ-2-Diabetes, kardiovaskulären und chronisch-entzündlichen Erkrankungen sowie mit bestimmten Typen von Tumoren. Das Mikrobiom wird damit auch zu einem biologischen Marker und Mittler der zunehmenden Last nichtübertragbarer Erkrankungen (Non-Communicable Diseases, NCDs).



Die Umwelt im Darm.

© iStock

Entstehung von Adipositas, Typ-2-Diabetes, kardiovaskulären Erkrankungen und bestimmten Tumoren beteiligt. Neuere Kohortendaten aus der Schweiz deuten darauf hin, dass eine gesundheitsförderliche, pflanzenbetonte Ernährungsweise mit einer signifikant reduzierten kardiovaskulären Mortalität assoziiert ist.

Vor diesem Hintergrund wird immer deutlicher, dass Ernährung einer der stärksten Einflussfaktoren für das Mikrobioms ist. Interventionsstudien zeigen, dass insbesondere eine ballaststoffreiche, pflanzenbasierte Ernährung mit hoher struktureller Vielfalt das Darmmikrobiom diversifiziert, und die Bildung gesundheitsfördernder Metaboliten wie SCFA unterstützt. SCFA wirken u.a. auf die Integrität der Darmbarriere, die Immunregulation, den Energiestoffwechsel sowie die endokrine und neurohumorale Signalübermittlung.

Damit wird deutlich: Ernährung ist nicht bloss als Zufuhr von Makro- und Mikronährstoffen zu verstehen, sondern als zentrale Steuergrösse eines mikrobiellen Ökosystems im menschlichen Körper. Der übliche Fokus auf Fett-, Zucker- und Salzzufuhr greift zu kurz, wenn die ökologische Dimension des Darmmikrobioms unberücksichtigt bleibt.

Vom Boden zum Darm

Die Verflechtung von Umwelt, Ernährung und Mikrobiom wird eindrücklich durch Arbeiten aus der Umweltmikrobiologie illustriert. Studien u. a. von Gabriela Berg (vgl. Beitrag S. 12) zum Mikrobiom von Lebensmitteln zeigen, dass Pflanzen kom-

Ernährung als Steuerungsfaktor

Parallel zu diesen mikrobiologischen Erkenntnissen haben sich die epidemiologischen Daten zur ernährungsbedingten Krankheitslast dramatisch geschärft. Globale Analysen, etwa der GBD 2019 Diet Collaborators, zeigen, dass ein erheblicher Anteil der weltweiten Mortalität und Morbidität auf ernährungsbedingte Risikofaktoren zurückzuführen ist.¹

Auch in der Schweiz ist eine inadäquate Ernährungsqualität massgeblich an der

plexe mikrobielle Ökosysteme tragen, die direkt in den menschlichen Organismus eingebracht werden.

Am Beispiel des Apfels konnte nachgewiesen werden, dass biologisch produzierte Früchte eine deutlich höhere mikrobielle Diversität aufweisen als konventionell erzeugte Produkte. Unterschiede zeigen sich nicht nur in der Gesamtkeimzahl, sondern insbesondere in der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften, mit potenziell relevanten Effekten auf die Komposition des menschlichen Mikrobioms.

Diese Befunde machen deutlich, dass landwirtschaftliche Produktionssysteme (z.B. der Einsatz von Pestiziden, Düngemitteln und Monokulturen) nicht nur ökologische Parameter wie Bodengesundheit und Biodiversität beeinflussen, sondern auch die mikrobiellen Expositionen entlang der Lebensmittelkette modifizieren – von der Rhizosphäre über die Pflanze bis in den menschlichen Darm.

Das Mikrobiom fungiert damit als biologisches Kontinuum zwischen Ökosystemen, Ernährungssystemen und menschlicher Gesundheit. Aus umweltmedizinischer Perspektive wird offensichtlich, dass Bodengesundheit, Biodiversität und agrar-

ökologische Praktiken integrale Bestandteile gesundheitlicher Prävention sind.

Die skizzierten Zusammenhänge haben weitreichende Konsequenzen für die ärztliche Praxis, die Gesundheitssysteme und die ärztliche Berufsethik.

Die vorliegende Evidenz verlangt nach einer stärkeren Integration von Ernährungsmedizin und Mikrobiom-Wissen in die medizinische Versorgung.

Klinische Praxis und Prävention

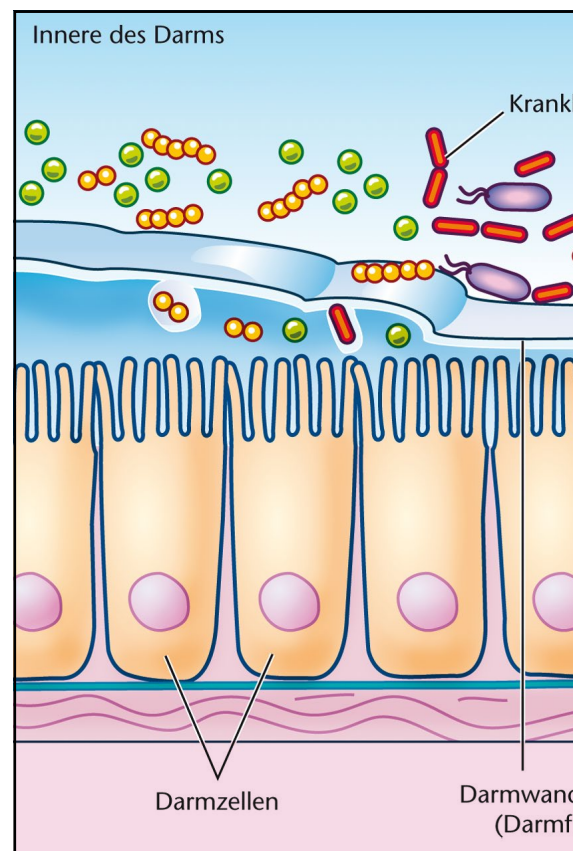
Ärztinnen und Ärzte sind häufig die ersten Ansprechpartner:innen für Menschen mit ernährungs- und lebensstilassoziierten Erkrankungen und geniessen hohe Glaubwürdigkeit in gesundheitsrelevanten Fragen.

Eine zukunftsfähige ärztliche Praxis sollte daher die Ernährung und Ernährungsumgebung systematisch in Anamnese und Beratung berücksichtigen. Also das Mikrobiom als erklärendes Modell nutzen, um die Relevanz einer pflanzenbetonten, ballaststoffreichen und möglichst wenig verarbeiteten Ernährung aufzuzeigen und dabei die sozialen und strukturellen Determinanten (z.B. Einkommen, Wohnumfeld, Verfügbarkeit gesunder Lebensmittel) explizit ansprechen.

Planetary Health Diet und Mikrobiom

Die von der EAT-Lancet-Kommission 2019 erstmals vorgestellte Planetary Health Diet versteht sich als evidenzbasierter Vorschlag für ein Ernährungsmuster, das sowohl die Gesundheit des Menschen als auch die planetaren Belastungsgrenzen berücksichtigt.² Die Planetary Health Diet umfasst pflanzliche Vielfalt, einen grossen Anteil an Vollkornprodukten, Hülsenfrüchten, Nüssen und Samen und propagiert einen deutlich reduzierten Konsum von rotem und verarbeitetem Fleisch. Dieses Ernährungsmuster

fördert nachweislich eine erhöhte mikrobielle Diversität im Darm und die Produktion antiinflammatorischer Metaboliten. Kohortendaten belegen, dass eine höhere Adhärenz an die Planetary Health Diet mit einer geringeren Gesamt- und insbesondere kardiovaskuläre Mortalität assoziiert ist.³ Diese Befunde lassen sich nur teilweise auf klassische Ernährungsempfehlungen (Fett-, Zucker-, Salzreduktion, mehr Ballaststoffe) zurückführen. Das Mikrobiom könnte hier die biologisch plausible Erklärung sein.





Die ärztliche Praxis soll die Ernährung und Ernährungsumgebung systematisch in Anamnese und Beratung berücksichtigen. Unten: Wo das Mikrobiom geschwächt ist, haben Krankheitserreger freie Bahn.

© www.julius-ecke.de

Patient:innen sollten dann erkennen, dass eigene Ernährungsmuster nicht isolierte Entscheidungen sind, sondern Interaktionen mit einem empfindlichen Ökosystem.

Aus- und Weiterbildung

Trotz der wachsenden Evidenz ist die Ernährung in der medizinischen Aus- und Weiterbildung weiterhin untervertreten. Das Mikrobiom figuriert häufig nur als Spezialthema.

Vor dem Hintergrund der hohen Last nicht übertragbarer Krankheiten und der Planetary-Health-Herausforderungen ist die Stärkung von Ernährungsmedizin, Umweltmedizin, sowie die Mikrobiomforschung in der medizinischen Ausbildung dringend.

Die deutsche Bundesärztekammer weist in ihrer Stellungnahme zur Planetary Health ausdrücklich darauf hin, dass Ärzt:innen ihre Praxis «environmentally sustainable» gestalten sollen und eine Verantwortung für die Gesundheit der Bevölkerung im Kontext ökologischer Krisen tragen.⁴

Ärztliche Advocacy und Umweltpolitik

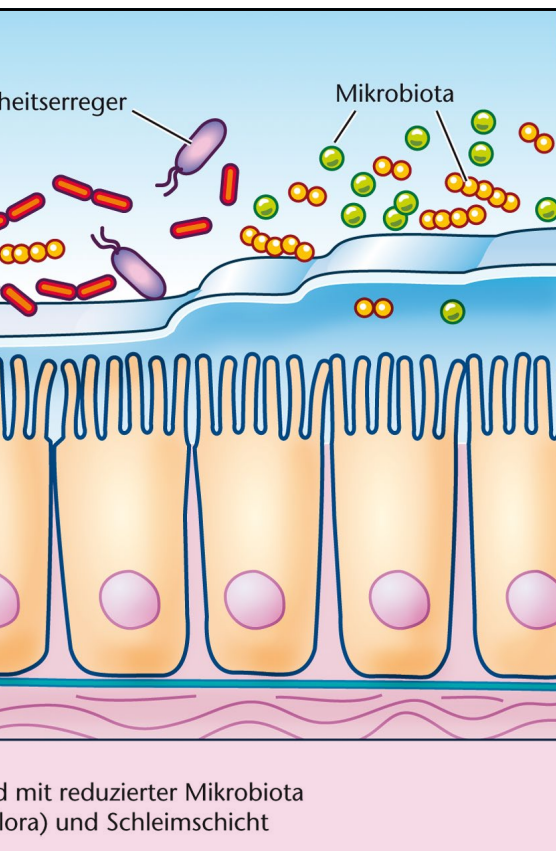
Die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) fordern seit Jahren, Gesundheitsförderung nicht auf individuelle Verhaltensänderungen zu verengen, sondern als strukturelle Aufgabe entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu begreifen. Das Mikrobiom liefert hierfür ein besonders anschauliches biologisches Argument. Landwirtschaftspolitik, Pestizidregulierung, Förderung ökologischer Produktionssysteme, nachhaltige und gesunde Kantinen- und Spitalverpflegung, Stadt- und Raumplanung (Food Environments) sind nicht nur ökologische oder agrarpolitische Themen, sondern Gesundheitsfragen, die direkt in das mikrobielle Milieu der Bevölkerung eingreifen.

Ärzt:innen können und sollten ihr berufliches Gewicht nutzen, um sich für biodiverse, pestizidärmere, pflanzenbetonte Ernährungssysteme einzusetzen – lokal, national und international. Das Mikrobiom sollte immer mehr Gegenstand der medizinischen Grundlagenforschung sein und somit ein «ethischer Kompass» für eine Medizin, die Verantwortung für gegenwärtige und zukünftige Generationen übernimmt.

Eine Medizin, die das Mikrobiom ernst nimmt, ist damit zwangsläufig eine Medizin, die planetare Grenzen schützt und ihre politische Stimme für eine gesunde Umwelt erhebt.

Weiterführende Literatur: Heselhaus, S.: Co-Benefits einer nachhaltigen Ernährungsberatung in der Kinder- und Jugendmedizin, 2025. <https://doi.org/10.35190/Paediatria.d.2025.4.3> sowie unter www.aefu.ch/oekoskop/heselhaus_literatur

Dr. med. Sabine Heselhaus ist Fachärztin Chirurgie mit eigener Facharztpraxis für komplexe Wunden in Adligenswil LU. Sie ist Mitglied des Zentralvorstands der Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU). Hier schreibt sie als Co-Präsidentin des Luzerner Ernährungsforum Stadt Land. sabine.heselhaus@hin.ch <https://ef-stadtland.ch/>



d mit reduzierter Mikrobiota (flora) und Schleimschicht

¹ GBD 2019 Diet Collaborators. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. The Lancet. 2019;393(10184):1958–1972. doi:10.1016/S0140-6736(19)30041-8

² Willett W et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet. 2019 Feb 2;393(10170):447–492.

³ Bui, LP et al. Planetary Health Diet Index und Risiko der Gesamt- und ursachenspezifischen Mortalität in drei prospektiven Kohorten. Am J Clin Nutr. 2024; 120:80–91.

⁴ Bundesärztekammer 2026 – Stellungnahme «Planetary Health und ärztliche Verantwortung». https://www.bundesaeztekammer.de/fileadmin/user_upload/zentrale-ethikkommission/ZEKO-Stellungnahme_Planetary_2026.pdf

Das Pflanzenmikrobiom und seine Vernetzung mit der Gesundheit

Gabriele Berg,
Technische Universität Graz (A)

Die Entdeckung des «essbaren Mikrobioms» verändert das Verständnis, was ein gesundes Lebensmittel ausmacht, grundlegend. Die wichtige Vielfalt der Mikroben gibt der Produktionsweise neues Gewicht.

Mikrobiome sind lokal und global vernetzt. Erkenntnisse aus der Mikrobiomforschung haben unser Verständnis von der Bedeutung der Umwelt für die Gesundheit grundlegend verändert. Die erste Erkenntnis war, dass jede Pflanze als Meta-Organismus eine funktionelle Einheit mit Mikroorganismen bildet, die im Laufe der Ko-Evolution entstanden ist. Das wird heute als Holobiont-Konzept bezeichnet.¹

Ein weiterer Schritt war die Erweiterung des Konzepts für One Health. Was ursprünglich für Zönosen beschrieben wurde, umfasst jetzt die Gesundheit aller Organismen inklusive der Pflanzen an einem Ort. Da Mikrobiome auch die Treiber der geochemischen Kreisläufe der Erde sind, sind sie ein wichtiger Faktor für die planetare Gesundheit.

Die Aufdeckung der Vielfalt in Pflanzenmikrobiomen und ihre interne Vernetzung und Vererbung hat viele Jahre mein Forschungsinteresse fixiert. Es war eine lange Reise über den Wurzelraum (Rhizosphäre) bis zu Samen, Früchten und Gemüsen. Das besondere Kapitel des «essbaren Mikrobioms» schlug ich mit einem eingeladenen Buchartikel über Visionen und Träume zum Pflanzenmikrobiom auf [1]².

Der Apfel als Modell für das essbare Mikrobiom

Der Apfel ist ein vielfaches Symbol. Er steht für Erkenntnis, Versuchung, Liebe und vor allem für Gesundheit. Wir haben den Apfel als Untersuchungsobjekt gewählt, um Schüler:innen den Paradigmenwechsel in Gesundheitsfragen zu erklären: Während einzelne Mikroorganismen

für Krankheiten verantwortlich sind, steht das Mikrobiom in seiner Vielfalt für Gesundheit.

Wir arbeiteten dazu gemeinsam mit «Sparkling Science», einem vom österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft geförderten Programm, das Jugendlichen einen Einblick in universitäre Forschung gewährt.³ In diesem Rahmen wurde das Mikrobiom des Apfels erstmals mit Hilfe von mikrobiologischer, molekularbiologischer sowie mikroskopischer Analysen untersucht. Wir dokumentierten die Vielfalt innerhalb mikrobieller Gemeinschaften bei biologisch und konventionell angebauten, gesunden und krankheitsanfälligen Äpfeln.⁴

Erkenntnisse zum Apfelmikrobiom

Dabei zeigten sich nachstehende wichtige Fakten.

- Äpfel haben ein sortenspezifisches Mikrobiom, das Domestikation und Züchtung im Laufe der Zeit veränderten. Ein Kernmikrobiom mit einem Anteil von ungefähr 50 % bleibt jedoch ursprünglich und entspricht dem Mikrobiom von Wildarten aus dem Tianshan («Himmelsgebirge») in Hochasien [2].
- Jeder Apfel beherbergt ungefähr 100 Millionen Bakterien. Diese leben hauptsächlich im Fruchtfleisch und im Samen, weniger auf der Schale [3].
- Die Äpfel aus dem biologischen Anbau haben eine andere Mikrobiota-Zusammensetzung als die aus konventionellem Apfelanbau [3].

- Starke Luftverschmutzung hat einen negativen Einfluss auf die Artenkombination im Apfelmikrobiom, was im urbanen Gartenbau besonders relevant ist [4].
- In Streuobstwiesen weisen die Äpfel mehr Vielfalt im Mikrobiom auf als in industriell betriebenen Anlagen [5].
- Lagerung und Transport zeigen starke Auswirkungen auf das Mikrobiom und das Resistom⁵: Lange Lagerung bewirkt eine Zunahme von (multi-)resistenten Pathogenen, was klinisch relevant werden kann und nicht mit äusserlich sichtbaren Veränderungen einhergeht [6].
- Frische Äpfel enthalten viele Bakterien mit potenziell probiotischen Eigenschaften für den Menschen.
- Verarbeitung (pürrieren, kochen, einwecken, trocknen) reduziert die Mikrobiota, aber niemals vollständig [7].
- Die Resistenzprofile gegen Antibiotika unterscheiden sich bei endophytischen (z.B. im Fruchtfleisch) und epiphytischen (auf der Schale) Bakterien in Äpfeln [8].

Hiermit konnte auch traditionelles Wissen wissenschaftlich bestätigt werden: Frische und lokale Früchte sind besonders gesund (eat fresh and local; an apple a day keeps the doctor away). Diese Erkenntnisse wurden später auch für andere Früchte und Gemüse beschrieben.

Dennoch blieb die Frage offen, ob dies wirklich Auswirkungen auf unsere Gesundheit hat.

Beeinflusst das essbare Mikrobiom unsere Gesundheit?

Die Verbindung zwischen Boden- und Pflanzenmikrobiom ist lange bekannt. Ob



Erstmals wurde das Mikrobiom des Apfels sowohl mikrobiologisch, molekularbiologisch wie auch mikroskopisch analysiert.

© Adobe Stock

aber das Mikrobiom der Pflanze, insbesondere der essbaren Früchte, Samen und Blätter, wirklich mit dem des menschlichen Darms vernetzt ist, war wesentlich schwieriger zu erschliessen. Um nachzuweisen, dass es eine Überlappung des Mikrobioms pflanzlicher Lebensmittel und unseres Darms gibt, haben wir alle vorhandenen Metagenomdaten von Früchten und Gemüse mit den menschlichen Metagenomdaten verglichen.

Demnach gibt es drei stark überlappende Gruppen: Enterobakterien, Burkholderien und Laktobazillen. Im Durchschnitt stellen diese drei Gruppen nur 2,2% des Darmmikrobioms. Bei Personen, die sich vegetarisch oder vegan ernähren, kann ihr Anteil jedoch bis zu 30% betragen.

In Verbindung mit den Ergebnissen grosser Kohortenstudien zeigt sich die besondere Rolle des Babyalters. Während der Stillperiode bestimmen hauptsächlich Bifidobakterien den Darm. Anschliessend wird der menschliche Darm weiter besiedelt. In diesem Zeitfenster ist es entscheidend, viel Gemüse und verschiedene Pflanzenarten zu essen, damit sich der Darm mit einem für die Gesundheit positiven Mikrobiom füllt. Denn das Mikrobiom erfüllt im gesunden Zustand beim Menschen viele essenzielle Funktionen [9] (vgl. auch Beitrag S. 9).

Neues Verständnis von gesunden Lebensmitteln

Die Qualität unserer Lebensmittel ist wichtig für Wohlbefinden, Energie und Gesundheit. Deshalb blickt die Forschung auf eine lange Suche zurück nach den

Entstehung und Verlust der mikrobiellen Diversität im Pflanzenreich

Die ersten Pflanzen eroberten vor etwa 475 Millionen Jahren das Land, aber erst vor 2 Millionen Jahren entwickelten sich die ersten Menschen. Diese zeitliche Dimension ist entscheidend, wenn wir heute Biodiversität betrachten. Die lange Zeitdauer der Koevolution von Pflanzen und Mikroben ist eine Ursache, warum die mikrobielle Diversität an und in Pflanzen heute immens hoch ist. Jede Pflanzenart besitzt ein partiell spezifisches Mikrobiom, was mit Sporen oder in Samen auf die nächste Generation vererbt wird.

Bislang wurde hauptsächlich das Mikrobiom von Kulturpflanzen untersucht. Für viele Pflanzenarten ist es noch gänzlich unbekannt. Zudem beherbergt jede Pflanze unterschiedliche Mikrobiome in Wurzel, Stängel, Blättern, Samen und Früchten. Erst seit ungefähr 30 Jahren können wir die Diversität mit neuen Hochdurchsatztechnologien untersuchen. Insgesamt leben heute auf der Erde ungefähr 10^{30} Bakterien und ihre Artenzahl wird auf 10^7 bis 10^{17} geschätzt.

Zu den Mikroorganismen gehören auch andere, mikroskopisch kleiner Lebewesen, die im Laufe der Evolution entstanden sind. Sie umfassen die gesamte Mikrobiota (Bakterien, Archaeen, Pilze, Protisten und Mikroalgen) und die spezifischen Gemeinschaften und Lebensräume (Mikrobiome), die sie miteinander bilden [12]. Für Pflanzen sind Bakterien oft die Schlüsselarten, aber auch Symbiosen mit Pilzen (Mykorrhiza) haben

sich im Laufe der Evolution herausgebildet. Während die Artenvielfalt in der Mikrobiota oft spezifisch ist, werden ähnliche Funktionen und Interaktionen vermittelt: Die Mikrobiota macht Nährstoffe und Spurenelemente verfügbar, unterstützt die Keimung und das Wachstum, indem sie Pflanzenhormone bildet und sie schützt die Wirtspflanze vor biotischem und abiotischem Stress.

Verlust der Vielfalt

Heute bewohnen 10^9 Menschen die Erde und verändern sie entscheidend. Die grosse Weltbevölkerung und vor allem unsere Aktivitäten wie intensive Landwirtschaft, Industrialisierung und Urbanisierung haben die Grenzen der planetaren Gesundheit längst überschritten, was unsere Erde in ersthafte Gefahr bringt. Zu den Folgen gehört beispielsweise der Klimawandel, die Schadstoffbelastung und der enorme Biodiversitätsverlust, der auch viele Pflanzen betrifft. Der Verlust mikrobieller Diversität ist dabei noch wenig bekannt, wird aber beim Menschen bereits deutlich: Es gibt immer mehr Krankheiten, die nicht mehr bekämpft werden können und eine signifikante Zunahme chronischer Krankheiten. Auch bei Kulturpflanzen zeigt sich dieser Trend: Hochertragssorten, synthetische Düngemittel und Pestizide sowie die globale industrielle Landwirtschaft führt zu einer Reduktion der Mikrobiomvielfalt und einem Anstieg von Pathogenen [13]. (vgl. auch Beitrag S. 17).



Gabriele Berg mit ihrem Studienobjekt in Blüte.

© TU Graz

Faktoren, die ein gesundes Lebensmittel ausmachen. Zunächst standen energie- und nährstoffreicher Produkte im Fokus. Später rückten auch Vitamine, Mineralstoffe oder sekundäre Pflanzenstoffe ins Interesse. Wir haben entdeckt und bewiesen, dass das Mikrobiom in der Nahrung ein entscheidender Faktor für die Gesundheit ist.

Das ermöglicht ein neues Grundverständnis über unsere Lebensmittel. Die Mikroorganismen sind Werkzeuge, die unsere Nahrung verdauen und wertvolle Stoffe wie Vitamine, Hormone, Mineralstoffe und kurzkettige Fettsäuren produzieren und zudem unser Immunsystem anregen. Vielfalt auf allen Ebenen ist wichtig: sowohl in der Auswahl der Lebensmittel als auch in deren mikrobieller Vielfalt. Das «essbare Mikrobiom» ist ein Wendepunkt im Verständnis gesunder Lebensmittel [10].

Bio-Lebensmittel können gesunde Lebenszeit verlängern

Bio-Lebensmittel enthalten nicht nur mehr Nährstoffe, Mineralien und Ballaststoffe, sie haben darüber hinaus ein diverseres Mikrobiom.

In Frankreich wurde 2013 das BioNutriNet-Projekt mit rund 35 000 Teilnehmer:innen gestartet. Im Vergleich zu konventionell ernährten Proband:innen, wurde die Ernährung von Bio-Konsument:innen mit höheren monetären Kosten, geringeren Umweltauswirkungen und einer geringeren Exposition gegenüber bestimmten Pestizidrückständen in Verbindung gebracht.

Der regelmässige Verzehr von Bio-Lebensmitteln war mit einem geringeren Risiko für Fettleibigkeit (-31 %), Typ-2-Diabetes (-35 %), postmenopausalen Brustkrebs (-38 %) und Lymphome (-76 %) verbunden [11]⁶.

Diese überzeugenden Daten werden durch neue Erkenntnisse der Exposomforschung unterstützt, da synthetische Pestizide, Dünger und (Mikro)plastik die mikrobielle Vielfalt vom Boden bis zum menschlichen Darm reduzieren. Die Ernährung mit frischen, wenig verarbeiteten und regionalen Bio-Lebensmitteln kann chronischen Krankheiten vermeiden und die gesunde Lebenszeit verlängern. ■

Referenzen unter www.aefu.ch/oekoskop/berg_referenzen

Prof. Dr. Gabriele Berg ist Biologin und Biotechnologin und forscht hauptsächlich zum Mikrobiom. Sie ist Professorin für Umweltbiotechnologie an der Technischen Universität (TU) Graz (A). Zudem leitet sie in Potsdam (D) am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) die Abteilung für Mikrobiom-Biotechnologie. Sie hat hier den Lehrstuhl für «Plant Microbiome Management» inne.
gabriele.berg@tugraz.at
<https://microbiome.gamelabgraz.at/>
 (spielerische Fakten mit «Tiny Biome Tales»-Spiel)
<https://imoox.at/course/microbiome>
 (Massive Open Online Course «Microbiome&Health», mit Zertifikat)

¹ Ein Holobiont ist demnach ein Gesamtlebewesen aus Wirt und Symbionten.

² Referenzen unter www.aefu.ch/oekoskop/berg_referenzen

³ <https://oead.at/de/studieren-forschen-lehren/citizen-science/sparkling-science>

⁴ Unser interdisziplinäres Projekt war speziell darauf ausgelegt, das Interesse der Schüler zu wecken und ein fächerübergreifendes Lernen anzuregen, das wissenschaftlich, technisch und künstlerisch ausgerichtet ist. Ergebnisse unter <https://apfelmikrobiom.tugraz.at/index.html>

⁵ Das Resistom umfasst alle mit einem Mikrobiom assoziierten Antibiotika-Resistenzgene (ARG).

⁶ <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8803492/>

Mikrobiomforschung und Ökolandbau: Wechselwirkungen ganzheitlich verstehen

Natacha Bodenhausen und Pascal Herren,
Forschungsinstitut für biologischen
Landbau (FiBL), Frick AG

Ein starkes Mikrobiom kann den Ökolandbau resilienter und nachhaltiger machen. Das FiBL sucht nicht nach einzelnen «Wundermikroben». Im Fokus stehen die Interaktionen zwischen Pflanzen und Boden.

Mikrobielle Gemeinschaften verbinden Boden, Pflanze, Tier und Mensch zu einem funktionalen Gesamtsystem. Die Mikrobiomforschung liefert heute zunehmend Einblicke, wie diese komplexen Wechselwirkungen gezielt eingesetzt werden können – und wo ihre Grenzen liegen.

Die landwirtschaftliche Praxis kann das Mikrobiom sowohl direkt (vgl. Grafik: A) als auch indirekt (B) nutzen.

Mikroben als Biostimulanzien und Pflanzenschutzmittel

Bereits heute gibt es verschiedene kommerzielle Produkte, zum Beispiel Biostimulanzien, die auch als Biodünger bezeichnet werden (vgl. Grafik: ①). Diese enthalten häufig Pilze oder Bakterien, die gezielt mit Nutzpflanzen interagieren. So besiedeln Trichoderma-Pilze die Wurzeln und fördern deren Wachstum. Mykorrhiza-Pilze wie Rhizophagus irregularis gehen eine symbiotische Beziehung mit der Pflanzenwurzel ein und verbessern dadurch die Erschliessung von Nährstoffen und Wasser im Boden. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Inokulation mit Mykorrhiza-Pilzen die grössten positiven Effekte hat, wenn der Boden ungesund ist [1]¹.

Neben Biostimulanzien werden auch Pflanzenschutzmittel auf mikrobieller Basis eingesetzt. Biologische Pflanzenschutzmittel können direkt als Saatgutbehandlung auf die Samen appliziert werden. Die verwendeten Mikroorganismen besiedeln danach nicht nur die Pflanzenwurzeln, sondern auch die Rhizosphäre. Andere Mittel können während des Pflanzenwachstums appliziert werden, etwa auf

die Blätter, wo sie die Phyllosphäre besiedeln. Solche Pflanzenschutzmittel können aus Bakterien wie *Bacillus amyloliquefaciens* oder Pilzen wie *Gliocladium catenulatum* bestehen. Beide werden gegen unterschiedliche Pilzkrankungen eingesetzt.

Direkte und indirekte Wirkung

Der Schutz vor Krankheitserregern kann auf zwei Wegen erfolgen. Zum einen wirken Mikroorganismen direkt, indem sie mit den Krankheitserregern um Raum und Nährstoffe konkurrieren oder antimikrobielle Substanzen bilden ②. Zum anderen können nützliche Mikroorganismen indirekt das pflanzliche Immunsystem stimulieren, indem sie eine induzierte Systemische Resistenz (ISR) auslösen. Dabei besiedeln sie die Wurzeln und versetzen die Pflanze in einen «Alarmzustand», sodass sie bei einem späteren Befall schneller und stärker reagieren kann ③. Ein klassischer Auslöser dieser ISR ist die Bakterienart *Pseudomonas fluorescens*.

Mikroorganismen können auch gegen Schädlinge eingesetzt werden ②. Ein Beispiel dafür ist *Metarhizium brunneum*, ein entomopathogener Pilz, der Insektenlarven infiziert und diese gezielt abtötet [2]. Diese Pilzart kann gegen bodenlebende Schädlinge wie Drahtwürmer oder Engerlinge eingesetzt werden, etwa in Kartoffeln oder Gemüsekulturen. Er ist im Biolandbau besonders relevant, weil er für Nichtzielorganismen weitgehend schonend ist.

Ein neuer Ansatz zur Bekämpfung von Schaderregern ist der gleichzeitige Einsatz verschiedener Mikrobenarten in sogenannten mikrobiellen Konsortien. Wichtig ist

dabei die Auswahl der Arten innerhalb dieser Konsortien. Denn komplementäre Spezies erhöhen nicht nur deren Wirksamkeit, sondern stärken auch die Resilienz des Konsortiums gegenüber variierenden Umweltbedingungen.

Risiken beim Einsatz von Mikroorganismen

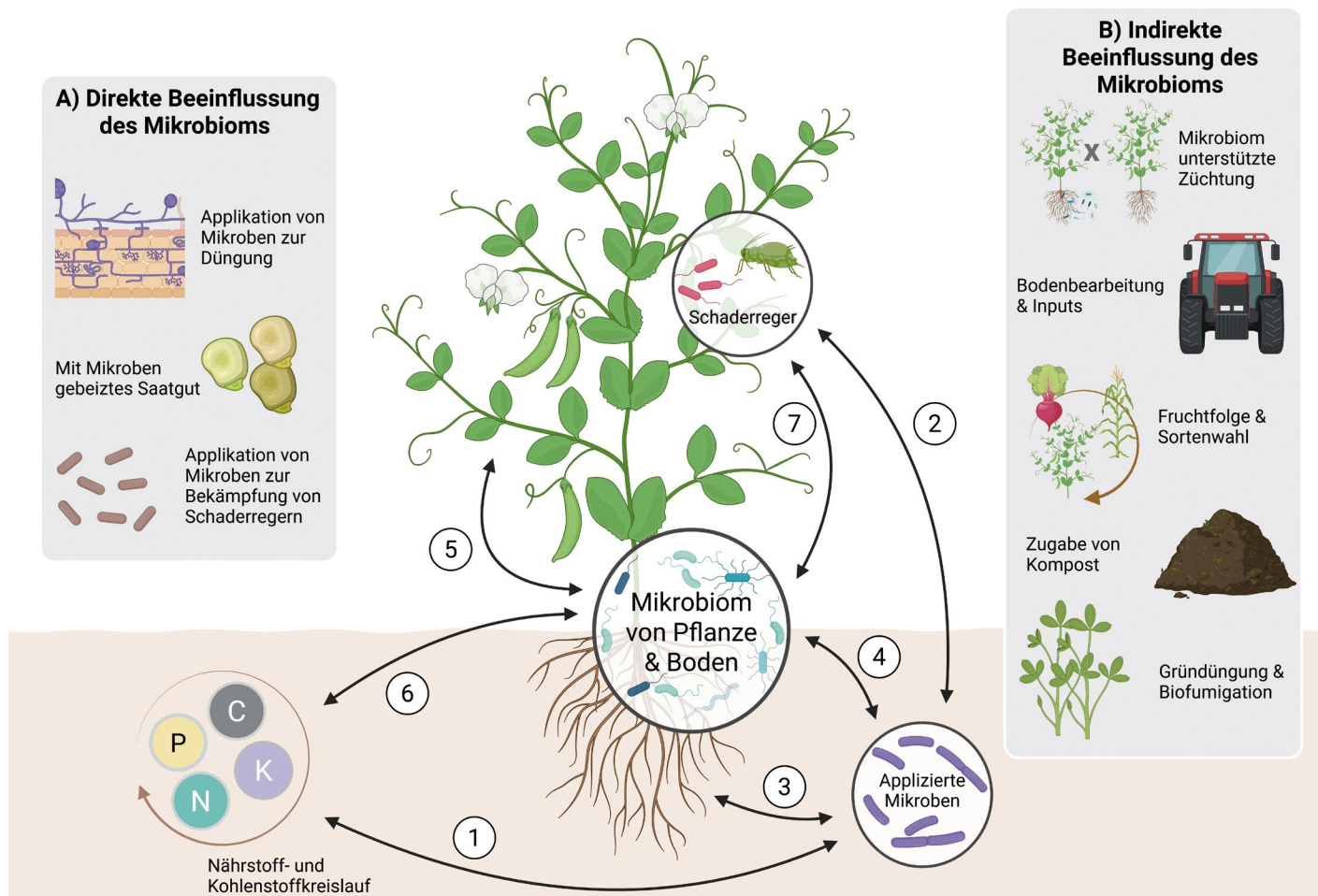
Die gezielte Zugabe von Mikroorganismen, etwa zur Schädlingsbekämpfung oder als Biodünger, ist mit Risiken und zum Teil hohen Kosten verbunden. Werden Mikroben aus ihrer natürlichen Umgebung in neue Ökosysteme eingebracht, besteht die Gefahr, dass sie invasiv werden, also sich ausbreiten und Schaden am Ökosystem anrichten.

Während invasive Pflanzen- und Tierarten intensiv erforscht werden, ist über invasive Mikroorganismen bislang nur wenig bekannt [3].

Zudem kann die gezielte Zugabe von Mikroorganismen das ökologische Gleichgewicht stören, indem die neuen Mikroorganismen andere nützliche Arten im Mikrobiom von Pflanze und Boden verdrängen ④. Um diese Risiken zu minimieren, sind sorgfältige Vorabprüfungen für die Zulassung von Mikroorganismen wichtig. Ein vielversprechender Ansatz ist dabei die Verwendung von Arten, die natürlicherweise in der jeweiligen Umgebung vorkommen.

Anstatt nützliche Mikroorganismen direkt auf dem Feld auszubringen, zeigt die

¹ Referenzen unter www.aefu.ch/oekoskop/bodenhausen-herren_referenzen



Viele Faktoren beeinflussen das Mikrobiom von Pflanze und Boden. Umgekehrt wirkt es selbst auf diese zurück. Der Landbau kann das Mikrobiom direkt (A) oder indirekt (B) nützen. Die Interaktionen (1–7) sind im Text erklärt. (Abbildung erstellt mit Biorender)

Forschung, dass sich das pflanzliche Mikrobiom auch durch verschiedene landwirtschaftliche und züchterische Massnahmen gezielt fördern lässt (B).

Beeinflussung durch Züchtung

Bei der Mikrobiom-unterstützten Züchtung wird das Mikrobiom gezielt in die Entwicklung neuer Nutzpflanzensorten einbezogen. Dies ist möglich, weil der Genotyp einer Pflanze, also ihre genetische Ausstattung, einen grossen Einfluss darauf hat, welche Mikroorganismen sich in ihrer Umgebung ansiedeln und welche Funktionen diese erfüllen.

Studien zeigen zum Beispiel, dass unterschiedliche Erbsengentypen jeweils charakteristische Gemeinschaften aus Bakterien und Pilzen aufweisen. Diese genotypspezifischen Mikrobiota stehen in engem Zusammenhang mit der Resistenz der Pflanzen gegenüber Wurzelfäule [4]. Durch die gezielte Auswahl geeigneter Genotypen kann somit indirekt auch ein gesundheitsförderndes Mikrobiom unterstützt werden ⑤.

Neben der Züchtung ist auch die Bewirtschaftung auf dem Feld entscheidend.

Beeinflussung durch Bewirtschaftungsform

Eine hohe pflanzliche Vielfalt, etwa durch Mischkulturen oder vielfältige Fruchtfolgen, steht mit einer geringeren Häufigkeit von Pflanzenkrankheiten in Zusammenhang. Durch Verdünnungseffekte sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Krankheitserreger auf geeignete Wirtspflanzen treffen. Gleichzeitig verbessert eine hohe Diversität die Qualität der organischen Substanz im Boden und fördert damit die mikrobielle Vielfalt ⑥. Zahlreiche Studien zeigen, dass eine hohe mikrobielle Diversität die Ausbreitung und Etablierung von Krankheitserregern ⑦ reduziert [5].

Zur Unterdrückung bodenbürtiger Krankheitserreger kann Kompost eingesetzt werden, wobei dessen Wirkung stark von der Zusammensetzung abhängt [6]. Die Mikrobiomforschung hilft, relevante Mikroorganismen zu identifizieren und Kompostierungsprozesse gezielt anzupassen. Auch Zwischenfrüchte stärken das Bodenmikrobiom.

Eine Metaanalyse zeigte, dass sie, insbesondere in Kombination mit weiteren angepassten Massnahmen, die mikrobielle

Biomasse, Aktivität und Diversität deutlich erhöhen [7].

Insgesamt bietet das Mikrobiom grosses Potenzial für einen resilienten und nachhaltigen Ökolandbau. Um dieses verantwortungsvoll zu nutzen, sind jedoch weitere Forschung und praxisnahe, standortangepasste Lösungen notwendig. ■

Referenzen unter: www.aefu.ch/oekoskop/bodenhausen-herren_referenzen
Dieser Beitrag erschien erstmals in der Zeitschrift *Ökologie&Landbau*, 2/26.
www.oekom.de/ausgabe/das-mikrobiom-83171

Dr. Natacha Bodenhausen ist Co-Leiterin der Gruppe Nährstoffmanagement und Symbiosen im Departement für Bodenwissenschaften am Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) in Frick AG. **Dr. Pascal Herren** arbeitet hier am Departement für Nutzpflanzenwissenschaften als stellvertretender Leiter der Gruppe Gemüse- und Gartenbau.
natacha.bodenhausen@fibl.org
www.fibl.org

Können Pflanzenschutzmittel die Bodengesundheit gefährden?

Elias Barmettler und
Marcel van der Heijden,
Universität Zürich und Agroscope

Neue Studien zeigen: Pflanzenschutzmittel beeinflussen
Bodenorganismen stärker als bisher angenommen.

Das wirft Fragen auf zum Schutz der Bodengesundheit
und zu den Auswirkungen auf den Menschen.

Die intensive Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (PSM), auch Pestizide genannt, hat zu deren weit verbreiteten Akkumulation in der Umwelt geführt. Diese Rückstände können ein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen. Während die Auswirkungen auf den Menschen, sowie auf bestimmte Lebewesen wie Wirbeltiere, Bestäuber und aquatische Organismen relativ gut untersucht sind, bestehen grosse Wissenslücken zu PSM-Effekten auf Bodenorganismen. Dies, obwohl Böden besonders stark PSM-Belastung ausgesetzt sind.

Böden sind die Grundlage der Nahrungsmittelproduktion und erbringen zahlreiche weitere wichtige Ökosystemleistungen, etwa die Speicherung von CO₂ oder die Reinigung des Grundwassers. Viele dieser zentralen Funktionen leisten Bodenorganismen – insbesondere

das Bodenmikrobiom (u.a. Bakterien und Pilze). Es ist daher unabdingbar, die Effekte von PSM auf Bodenorganismen und letztlich die Bodengesundheit als Ganzes besser zu verstehen.

EU-Studie zeigt das Ausmass

Diesem Ziel widmete sich eine kürzlich in der Fachzeitschrift Nature veröffentlichte Studie, an der unter anderem Forschende der Universität Zürich beteiligt waren [1]. Die Studie untersuchte Bodenproben von 373 Standorten in 26 Ländern der Europäischen Union auf Rückstände von 118 synthetischen PSM und deren Abbauprodukte.

Zusätzlich erhob sie mittels DNA-Analysen die Biodiversität und die Häufigkeit von relevanten Organismengruppen. Mit statistischen Methoden wurde anschliessend untersucht, wie stark PSM-Rück-

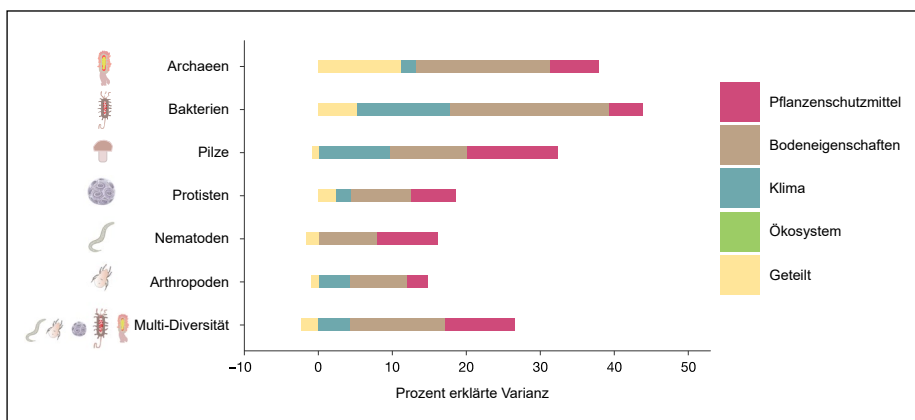
stände die Bodenorganismen beeinflussen im Vergleich zu anderen relevanten Faktoren wie Bodeneigenschaften, Klima und Ökosystemtyp (vgl. Grafik).

Von den 118 gemessenen PSM liessen sich 63 in mindestens einem Boden nachweisen. In 70 % der untersuchten Böden fanden sich Rückstände von einem oder mehreren PSM. Böden von Ackerflächen und Dauerkulturen, die rund zwei Drittel der Standorte ausmachten, waren am stärksten belastet. Es wurden jedoch auch verbreitet PSM in extensiven Wiesen und Wäldern nachgewiesen. Am häufigsten fanden sich Fungizide, gefolgt von Herbiziden und Insektiziden. Das Herbizid Glyphosat, zusammen mit seinem Hauptabbauprodukt, war das an den meisten Standorten nachgewiesene PSM – passend zu seiner sehr breiten Anwendung.

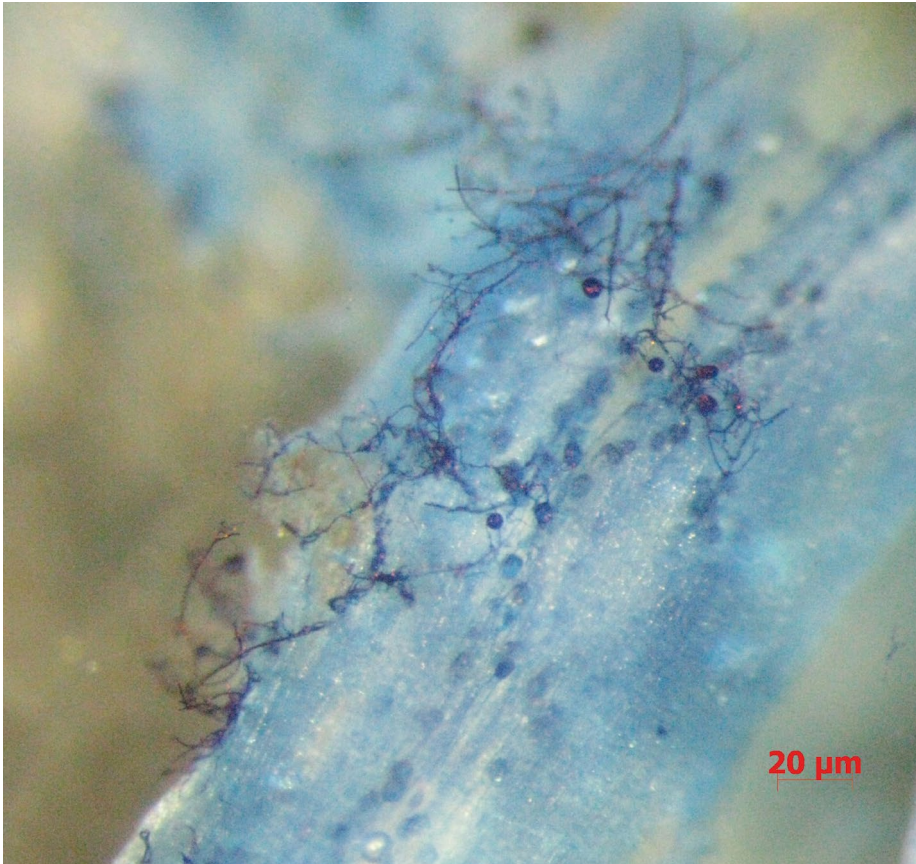
Mykorrhizapilze besonders betroffen

Die Studie zeigte zudem, dass PSM-Rückstände einen starken Einfluss auf viele Bodenorganismen hatten. Nach den Bodeneigenschaften wie zum Beispiel pH-Wert oder Humusgehalt, waren PSM der zweitwichtigste Einflussfaktor für die gesamte Biodiversität im Boden (vgl. Grafik). Die Art und Stärke der Effekte variierte jedoch stark je nach Organismengruppe.

Beispielsweise korrelierten die Diversität von Bakterien und verschiedene bakterielle Funktionen relativ schwach mit PSM und die Effekte waren eher positiv. Das heisst, erhöhte PSM-Rückstände führten tendenziell zu grösserer bakterieller



Effekt von Pflanzenschutzmitteln und anderen Parametern auf die Diversität von verschiedenen Bodenorganismen. Diversität als Vielfalt (Anzahl verschiedene Organismen) ausgedrückt. Die Gesamtlänge des Balkens gibt an, wie gut die verschiedenen Variablen die Diversität in statistischen Modellen erklären konnten. Angepasste Abbildung von [1].



Mikroskop-Aufnahmen von
arbuskulären Mykorrhizapilzen.

© Raphaël Boussageon

Diversität. Im Gegensatz dazu zeigte die Diversität von Pilzen eine grosse Empfindlichkeit gegenüber PSM-Rückständen mit einem negativen Zusammenhang. Die Diversität nahm also ab, je höher die PSM-Konzentrationen waren.

Unter den Pilzen stachen besonders die arbuskulären Mykorrhizapilze (AM-Pilze, s. Foto) heraus, die eine besonders hohe Sensitivität gegenüber PSM zeigten. AM-Pilze gehen Symbiosen mit ca. 80 % der Landpflanzen ein und fördern das Pflanzenwachstum, indem sie diese mit essenziellen Nährstoffen und Wasser versorgen, sowie ihre Krankheitsresistenz verbessern. Bereits frühere Studien zeigten eine hohe Sensitivität von AM-Pilzen gegenüber PSM auf. Die zentralen Funktionen von AM-Pilzen für viele Ökosysteme und den Anbau von Nutzpflanzen könnten somit durch intensiven PSM-Einsatz in Mitleidenschaft gezogen werden.

Schweizer Erkenntnisse stimmen überein

Die Ergebnisse dieser EU-weiten Studie stimmen gut überein mit den Resultaten einer schweizweiten Untersuchung von Böden in Rebbergen, durchgeführt von

Forschenden der Agroscope und der Universität Zürich [2,3]. Aufgrund der grossen Anfälligkeit der Rebe gegenüber Pilzkrankheiten, werden Rebberge besonders intensiv mit PSM – besonders Fungiziden – behandelt. Dieses Forschungsprojekt umfasste 62 Rebberge, von denen etwa die Hälfte biologisch bewirtschaftet wird, also ohne die Verwendung von synthetischen PSM. Ähnlich wie die EU-Studie untersuchte das Schweizer Projekt die Böden auf 146 synthetische PSM und machte DNA-Analysen, um die Auswirkungen der PSM auf die bakteriellen und pilzlichen Gemeinschaften zu charakterisieren.

Persistente Pestizide

Auch hier waren PSM-Rückstände weit verbreitet. In allen Rebbergen fanden sich PSM-Mischungen mit bis zu 60 verschiedenen Substanzen pro Rebberg. Obwohl die PSM-Gehalte mit zunehmender Dauer der Biobewirtschaftung deutlich abnahmen, konnten nach über 20 Jahren noch immer bis zu 32 verschiedene PSM nachgewiesen werden. Dies verdeutlicht die grosse Persistenz von PSM im Boden. Viele PSM bleiben deutlich länger im Boden,

als man gemäss ihrer Abbaurate erwarten würde. Das liegt unter anderem daran, dass PSM über die Zeit zunehmend vom Boden sorbiert werden, wodurch sich ihr Abbau verlangsamt. Zudem wurden die nachgewiesenen PSM-Konzentrationen mit der jeweiligen Toxizität der Substanz verglichen und in vielen Fällen als potenzielles Risiko für Bodenorganismen eingestuft.

Die Analysen der PSM-Effekte auf das Bodenmikrobiom zeigten – ähnlich zur EU-Studie – dass Bakterien und Pilze sehr unterschiedlich reagierten. Während Bakterien von PSM-Rückständen kaum beeinflusst schienen, standen die Pilzdiversität und -zusammensetzung in einem deutlich negativen Zusammenhang mit PSM (vgl. Abbildung 2). Die höhere Sensitivität von Pilzen könnte teilweise darin begründet sein, dass viele der im Pflanzenschutz angewendeten PSM Fungizide sind, während Bakterizide weniger häufig zur Anwendung kommen. Zudem gibt es viele Bakterien, die PSM abbauen und für ihr Wachstum verwenden können.

Kupfer als weiterer Stressor

Neben synthetischen PSM wurden in dieser Weinbau-Studie auch die Effekte von Kupfer untersucht. Die fungizide Wirkung von Kupfer ist bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannt, woraufhin es im Weinbau intensiv zur Bekämpfung des falschen Mehltaus zum Einsatz kam. Kupfer wird auch heute noch eingesetzt. Besonders im Biolandbau, wo es bisher keine alternativen Mittel gegen falschen Mehltau gibt, aber auch im konventionellen Anbau. Als Schwermetall wird Kupfer im Boden nicht abgebaut und auch kaum ausgewaschen. Daher hat es sich über die Jahrzehnte in vielen Rebbergen stark angereichert.

In der Studie fiel zuerst auf, dass die gemessenen Kupferkonzentrationen deutlich höher waren als in anderen Weinbau-

gebieten Europas. Das könnte teilweise am feuchteren Klima in der Schweiz liegen, was den Krankheitsdruck mit falschem Mehltau erhöht. Kupfer zeigte einen sehr deutlichen Einfluss auf das Bodenmikrobiom. Erhöhte Kupfergehalte standen in starkem Zusammenhang mit einer reduzierten bakteriellen Diversität.

Zudem beeinflussten sie die Zusammensetzung von Bakterien und Pilzen deutlich: Selbst auf sehr hoher taxonomischer Stufe wie Phylum (Stamm) oder Klasse wurden viele Gruppen identifiziert, die sensitiv auf Kupfer reagierten. Die Stärke des Kupfereffekts war vergleichbar mit dem pH-Wert, einem sehr bekannten Einflussfaktor für Bodenmikroorganismen. Bakterien reagierten tendenziell stärker auf Kupfer als Pilze – also gerade gegenteilig zu synthetischen PSM.

Schliesslich entscheidet die Politik

Insgesamt lassen diese Studien darauf schliessen, dass der PSM-Einsatz einen stärkeren Einfluss auf Bodenorganismen hat als bisher angenommen. Insbesondere die Effekte von PSM auf das Bodenmikrobiom fanden bisher kaum Beachtung. Auch wenn die Studienlage zurzeit noch relativ dünn ist, werfen diese Ergebnisse Fragen auf, ob der PSM-Einsatz wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen und schliesslich die Bodengesundheit gefährden kann. Weitere Forschung ist notwendig, um diesen Fragen auf den Grund zu gehen.

Gleichzeitig erhärten sich die Erkenntnisse über negative Effekte von PSM auf andere Nichtzielorganismen wie Vögel, Bestäuber oder aquatische Organismen. Laut dem One-Health-Ansatz der WHO stehen die Gesundheit von Mensch, Tieren und Umwelt im Zusammenhang. Neben den direkten Effekten von PSM auf den Menschen, könnten sich deren Um-



welteffekte also auch indirekt auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Die Wissenschaft ist an einem Punkt, an dem sich die negativen Folgen des PSM-Einsatzes für die Umwelt nicht mehr wegdiskutieren lassen.

Nun ist es an der Politik zu entscheiden, welche Risiken toleriert werden sollen und welche Umweltkosten den Nutzen von PSM übersteigen. Sowohl die Schweiz wie die EU haben Programme zur Reduktion von PSM-Risiken lanciert. Ob diese ausreichen, um den PSM-bedingten Schwund der Biodiversität zu stoppen wird von vielen unabhängigen Stellen hinterfragt. Derweil nimmt die Anwendung von PSM in der übrigen Welt weiter zu.

Die gute Nachricht ist, dass zahlreiche landwirtschaftliche Praktiken existieren, die eine Reduktion von PSM oder gar einen Verzicht darauf ermöglichen, beispielsweise angepasste Anbaumethoden und der Anbau von resistenten Sorten (vgl. Beitrag S. 15). Solche alternativen Praktiken zu fördern wird eine zentrale Aufgabe der kommenden Jahrzehnte sein – für eine gesunde Umwelt und gesunde Menschen. ■

Dr. Elias Barmettler ist Agronom und Postdoc an der Universität Zürich und bei Agroscope, dem Kompetenzzentrum des Bundes für landwirtschaftliche Forschung. Er forscht zum Einfluss von Pflanzenschutzmitteln auf Bodenorganismen mit einem Fokus auf Mikroorganismen.

Prof. Dr. Marcel van der Heijden forscht und lehrt an der Universität Zürich und bei Agroscope. Seine Forschung konzentriert sich auf die Mikrobiome von Pflanzen und Böden in Agroökosystemen und untersucht, wie diese das Pflanzenwachstum und Ökosystemfunktionen beeinflussen. Ein besonderer Fokus liegt auf arbuskulären Mykorrhizapilzen.

elias.barmettler@uzh.ch

marcel.vanderheijden@uzh.ch

<https://www.vanderheijdenlab.ch/>

[1] Königer, J. et al. Pesticide residues alter taxonomic and functional biodiversity in soils. *Nature* 650, 367–373 (2026).

[2] Barmettler, E. et al. Double the trouble: High levels of both synthetic pesticides and copper in vineyard soils. *Environ. Pollut.* 375, 126356 (2025).

[3] Barmettler, E. et al. Copper and synthetic pesticides are major drivers of soil bacterial and fungal communities. *J. Hazard. Mater.* 507, 141682 (2026).

Mikroben in tauendem Eis und Permafrost

Beat Frey, Eidgenössische
Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft (WSL)

Gletscher und Permafrost beherbergen vielfältige
Mikroben. Diese an Kälte angepassten Organismen
sind sowohl Archive der Erdgeschichte wie auch
eine vielversprechende Ressource für die Forschung.



Wissenschaftliche «Mikrobenernte» aus dem (noch) Permafrost.

© WSL

Gletscher wirken auf den ersten Blick wie lebensfeindliche Räume: kalt, nährstoffarm und weitgehend isoliert. Doch dieser Eindruck täuscht. Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass diese sogenannten kryogenen Lebensräume eine bemerkenswert hohe mikrobielle Vielfalt beherbergen. In Eis und gefrorenen Sedimenten finden sich Bakterien, Archaeen¹, Pilze, Algen sowie eine Vielzahl bislang unbekannter Viren, die häufig über Zeiträume von Jahrhunderten bis Jahrtausenden konserviert sind und sich an extreme Bedingungen angepasst haben.

Erst in den vergangenen Jahren hat die Forschung begonnen, diese verborgene Biosphäre systematisch zu erschliessen. Dabei zeigt sich: Lebensräume der Kryosphäre zählen zu den am wenigsten verstandenen biologischen Systemen der Erde und zugleich zu denjenigen, die potenziell am stärksten von der Klimaerwärmung beeinflusst werden.

Unsichtbare Vielfalt im Eis

Unsere Untersuchungen aus alpinen und arktischen Regionen belegen, dass selbst in nährstoffarmen und extrem kalten Lebensräumen komplexe mikrobielle Gemeinschaften existieren. In einzelnen Proben aus Eis oder Permafrostböden lassen sich häufig mehrere hundert bis tausend taxonomische Einheiten nachweisen. Viele davon sind bislang unbekannt oder nur entfernt mit bekannten Arten verwandt. Diese Befunde stellen die traditionelle Vorstellung kryosphärischer Systeme als biologisch marginale Räume grundlegend infrage.



Dramatische Gletscherschmelze, hier am Morteratsch GR. Damit schwinden auch die Lebensräume für die Kältespezialisten unter den Mikroben.

© WSL

Diese Organismen leben unter Bedingungen, die für die meisten Lebensformen extrem sind: Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt, nur begrenzt verfügbare Nährstoffe und z.T. vollständige Dunkelheit. Dennoch sind sie nicht nur überlebensfähig, sondern häufig auch metabolisch aktiv, wenn auch auf sehr niedrigem Niveau.

Viele der eingeschlossenen Mikroben können lange Phasen metabolischer Inaktivität überdauern und unter geeigneten Bedingungen wieder aktiv werden. Grundlage dafür sind hochspezialisierte Anpassungen wie flexible Zellmembranen, kälteaktive Enzyme und eine drastische Reduktion metabolischer Prozesse.

Gletscher als Archive der Erdgeschichte

Gletscher und Permafrost sind nicht nur Lebensräume, sondern auch Archive. In ihnen sind Mikroorganismen und ihre genetischen Informationen über lange Zeiträume konserviert. Insbesondere Viren lassen sich entlang verschiedener Eisschichten nachverfolgen und ermöglichen Einblicke in evolutionäre Prozesse unter vergangenen Umweltbedingungen.

Auch in frisch freigelegten Gletschervorfeldern zeigt sich die Bedeutung dieser Mikroorganismen: Sie zählen zu den ersten Besiedlern neuer Lebensräume. Indem sie altes organisches Material umwandeln und Nährstoffe verfügbar machen, schaffen sie die Grundlage für die spätere Entwicklung von Böden und

komplexeren Ökosystemen. Mikroorganismen aus Gletschern sind somit mehr als bloss Relikte vergangener Umweltbedingungen. Sie stellen zugleich eine bislang nur unzureichend erschlossene Ressource dar, deren wissenschaftliche und technologische Bedeutung erst ansatzweise verstanden ist.

Mit dem fortschreitenden Klimawandel geraten diese Lebensräume zunehmend unter Druck. Gletscher schmelzen, Permafrost taut und mit ihnen verschwindet eine einzigartige mikrobielle Vielfalt, oft bevor sie überhaupt entdeckt wurde.

Ein Wettlauf gegen die Zeit

Vor dem Hintergrund des raschen Gletscherrückgangs und der Destabilisierung von Permafrostböden gewinnen Initiativen zur Sicherung dieser Biodiversität zunehmend an Bedeutung. Mikrobielle Biobanken bilden hierfür eine zentrale Forschungsinfrastruktur, in der isolierte Mikroben aus Kältehabitaten unter kontrollierten Bedingungen, typischerweise bei -80°C , langfristig konserviert werden.

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sammelt und lagert entsprechende Isolate in einer mikrobiellen Biobank am Standort Birmensdorf ZH. Bereits über 1500 Arten konnten so erhalten werden – ein kleiner Ausschnitt der geschätzten Hunderttausenden von Mikroben, die allein in Schweizer Gletschern und Permafrostböden vorkommen dürften. Die systematische Erfassung dieser Organismen ist

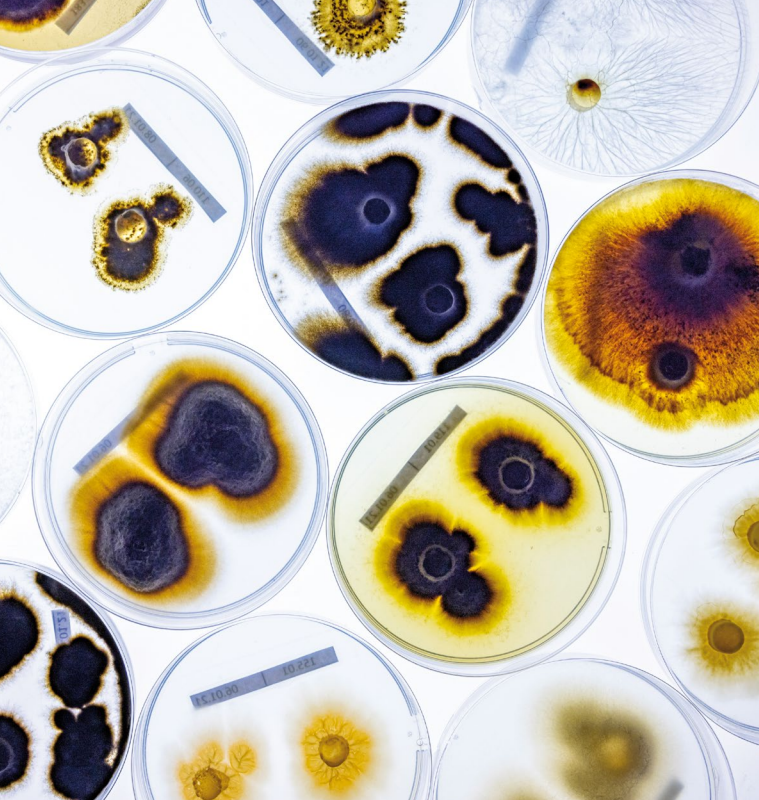
insbesondere deshalb von Bedeutung, weil viele von ihnen aus bislang kaum untersuchten Ökosystemen stammen.

Solche mikrobiellen Biobanken sind weit mehr als Archive. Neben dem Erhalt genetischer Ressourcen, ermöglichen sie zudem die experimentelle Charakterisierung physiologischer und biochemischer Eigenschaften. Dadurch entsteht eine Art «Bibliothek des Lebens», die sowohl für die Grundlagenforschung als auch für angewandte Fragestellungen von grosser Bedeutung ist. Ziel ist es, diese Organismen nicht nur zu bewahren, sondern auch ihre Eigenschaften zu verstehen und für zukünftige Forschung nutzbar zu machen.

Biotechnologisches Potenzial

Ein zentrales Interesse gilt den funktionellen Eigenschaften kälteadaptierter Mikroorganismen, insbesondere ihren Enzymen. Diese sogenannten psychophilen oder psychrotoleranten Enzyme zeichnen sich durch eine hohe katalytische Aktivität bei niedrigen Temperaturen aus. Im Vergleich zu thermophilen Systemen eröffnen sie Potenziale für energieeffiziente industrielle Prozesse.

Ein vielversprechendes Anwendungsfeld liegt im Bereich des Polymerabbaus. Unsere experimentellen Studien zeigen, dass einige Bakterien und Pilze aus der Biobank in der Lage sind, sowohl natürliche als auch synthetische Polymere zu metabolisieren. Dazu zählen unter anderem Polyurethane und Polymilchsäure,



Pilze für die Biobank (links). Ein Mitarbeiter gefriert die präparierten Isolate aus dem Eis (wieder) für die Biobank ein (rechts).

© WSL

deren Abbau bereits bei moderaten Temperaturen erfolgen kann. Der Abbau besonders stabiler Kunststoffe wie Polyethylen stellt jedoch weiterhin eine erhebliche Herausforderung dar.

Der Einsatz kalteadaptierter Enzyme könnte zur Entwicklung nachhaltiger Recyclingverfahren beitragen. Statt Kunststoffe unter hohem Energieaufwand zu schmelzen oder chemisch zu behandeln, könnten künftig verstärkt biologische Verfahren zum Einsatz kommen. Zwar steht die Forschung hier noch am Anfang, doch das Potenzial ist erheblich.

Neue Wirkstoffe aus extremen Lebensräumen

Neben umwelttechnologischen Anwendungen rückt auch die medizinische Relevanz dieser Mikroorganismen zunehmend in den Fokus. In ihren extremen Lebensräumen stehen sie unter starkem Selektionsdruck und konkurrieren um begrenzte Ressourcen. Dies erklärt, warum viele dieser Mikroben zur Selbstverteidigung bioaktive Substanzen produzieren. Solche Stoffe sind von grossem Interesse, insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung neuer Antibiotika. Angesichts zunehmender Resistenzen gegenüber bestehenden Wirkstoffen wächst der Bedarf an neuartigen antibiotischen Substanzen. Mikroorganismen aus bislang kaum erforschten Habitaten könnten hierbei eine wichtige Rolle spielen.

Gleichzeitig ermöglicht die Untersuchung kryosphärischer Mikroorganismen grundlegende Einblicke in die Anpassungsfähigkeit von Leben unter extremen Bedingungen. Diese Erkenntnisse sind nicht nur für die mikrobielle Ökologie relevant, sondern auch für astrobiologische Fragestellungen² von Bedeutung.

Ressourcen der Zukunft?

Das Auftauen von Permafrost wirft jedoch auch Fragen auf. In den gefrorenen Böden sind Mikroorganismen konserviert, die teilweise seit Jahrtausenden inaktiv sind. Mit steigenden Temperaturen könnten einige von ihnen wieder aktiv werden. Nach aktuellem Kenntnisstand ist das Risiko durch Krankheitserreger für Tiere und Menschen aus dem Eis gering, da die meisten dieser Mikroorganismen stark an ihre extremen Lebensräume angepasst sind und in einer wärmeren Umgebung nur geringe Überlebenschancen haben. Dennoch unterstreicht diese Entwicklung, wie dynamisch und zugleich wenig verstanden diese Systeme sind.

Der fortschreitende Klimawandel führt zu einem beschleunigten Rückgang kryosphärischer Lebensräume. Damit geht nicht nur der Verlust einzigartiger Landschaftselemente einher, sondern auch ein Verlust bislang unerforschter biologischer Vielfalt. Es wächst die Dringlichkeit, diese verborgene Vielfalt besser zu verstehen. Die Etablierung mikrobieller Biobanken

kann diesen Prozess nicht aufhalten, jedoch dazu beitragen, einen Teil dieser Biodiversität für zukünftige Forschung zu sichern.

Die Erforschung von Mikroorganismen aus Eis und Permafrost steht noch am Anfang. Doch schon jetzt zeichnet sich ab, dass sie weit mehr sind als biologische Kuriositäten. Sie liefern Einblicke in die Grenzen des Lebens, dokumentieren vergangene Umweltbedingungen und könnten zugleich eine wichtige Ressource für zukünftige Technologien und die Medizin darstellen.

Dr. Beat Frey ist Mikrobiologe mit Schwerpunkt mikrobielle Ökologie und Leiter der Forschungsgruppe Rhizosphären-Prozesse an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Er leitet verschiedene Forschungsprojekte zu Klimawandel und Mikroorganismen in alpinen und arktischen Ökosystemen.
beat.frey@wsl.ch
www.wsl.ch/de/mitarbeitende/frey/#projects

¹ Archaeen (früher auch Urbakterien genannt) sind einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern und ohne membranumhüllte Organellen (Prokaryoten). Sie gehören zu den ältesten Lebensformen der Erde und können extreme Bedingungen überleben.

² Astrobiologische Fragestellungen betreffen die Suche nach Leben im Universum, die Voraussetzungen für lebensfreundliche Umgebungen und die mögliche Entstehung und Anpassung von Leben im Weltraum.

Terminkärtchen und Rezeptblätter für Mitglieder: Jetzt bestellen!



Liebe Mitglieder

Sie haben Tradition und viele von Ihnen verwenden sie: unsere Terminkärtchen und Rezeptblätter. Wir geben viermal jährlich Sammelbestellungen auf.

Jetzt oder bis spätestens 31. Juli 2026 bestellen. Die Lieferung erfolgt Mitte August 2026. Mindestbestellmenge pro Sorte: 1000 Stk.

Preise Terminkärtchen: 1000 Stk. CHF 200.–; je weitere 500 Stk. CHF 50.–
Rezeptblätter: 1000 Stk. CHF 110.–; je weitere 500 Stk. CHF 30.–
Zuzüglich Porto und Verpackung. Musterkärtchen: www.aefu.ch

Bestell-Talon

Einsenden an: Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz,
Postfach 620, 4019 Basel, Fax 061 383 80 49

Ich bestelle:

- _____ Terminkärtchen «Leben in Bewegung»
_____ Terminkärtchen «Luft ist Leben!»
_____ Terminkärtchen «für weniger Elektrosmog»
_____ Rezeptblätter mit AefU-Logo

Folgende Adresse à 5 Zeilen soll eingedruckt werden
(max. 6 Zeilen möglich):

Name / Praxis

Bezeichnung, SpezialistIn für...

Strasse und Nr.

Postleitzahl / Ort

Telefon

Name:

Adresse:

KSK.Nr.:

EAN-Nr.:

Ort / Datum:

Unterschrift:

Dr. med. Petra Muster-Gültig
Fachärztin für Allgemeine Medizin FMH

Beispielstrasse 345
CH-6789 Hinwil
Tel. 099 123 45 67

ÄRZTINNEN UND ÄRZTE FÜR UMWELTSCHUTZ
MEDECINS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT
MEDICI PER L'AMBIENTE

Ihre nächste Konsultation

Datum	Zeit
Montag	
Dienstag	
Mittwoch	
Donnerstag	
Freitag	
Samstag	

Leben in Bewegung
Rückseite beachten!

Das beste Rezept für Ihre Gesundheit und eine intakte Umwelt!

Bewegen Sie sich eine halbe Stunde im Tag:
zu Fuss oder mit dem Velo auf dem Weg zur Arbeit, zum Einkaufen, in der Freizeit.

So können Sie Ihr Risiko vor Herzinfarkt, hohem Blutdruck, Zuckerkrankheit, Schlaganfall, Darmkrebs, Osteoporose und vielem mehr wirksam verkleinern und die Umwelt schützen.

Eine Empfehlung für Ihre Gesundheit

Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz
Postfach 620, 4019 Basel
Tel. 061 322 49 49 www.aefu.ch, info@aefu.ch

Dr. med. Petra Muster-Gültig
Fachärztin für Allgemeine Medizin FMH

Beispielstrasse 345
CH-6789 Hinwil
Tel. 099 123 45 67

ÄRZTINNEN UND ÄRZTE FÜR UMWELTSCHUTZ
MEDECINS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT
MEDICI PER L'AMBIENTE

Ihre nächste Konsultation

Datum	Zeit
Montag	
Dienstag	
Mittwoch	
Donnerstag	
Freitag	
Samstag	

Luft ist Leben!
Rückseite beachten!

Stopp dem Feinstaub! (PM 10)

Feinstaub macht krank
Feinstaub setzt sich in der Lunge fest
Feinstaub entsteht vor allem durch den motorisierten Verkehr

Zu Fuss, mit dem Velo oder öffentlichen Verkehr unterwegs:
Ihr Beitrag für gesunde Luft!

Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz
Postfach 620, 4019 Basel

Dr. med. Petra Muster-Gültig
Fachärztin für Allgemeine Medizin FMH

Beispielstrasse 345
CH-6789 Hinwil
Tel. 099 123 45 67

ÄRZTINNEN UND ÄRZTE FÜR UMWELTSCHUTZ
MEDECINS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT
MEDICI PER L'AMBIENTE

Ihre nächste Konsultation

Datum	Zeit
Montag	
Dienstag	
Mittwoch	
Donnerstag	
Freitag	
Samstag	

für weniger Elektrosmog
Rückseite beachten!

Weniger Elektrosmog beim Telefonieren und Surfen

☺ Festnetz und Schnurtelefon
☺ Internetzugang übers Kabel
☺ nur kurz am Handy – SMS bevorzugt
☺ strahlenarmes Handy
☺ Head-Set
☺ Handy für Kinder erst ab 12

Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz
Postfach 620, 4019 Basel
Tel. 061 322 49 49
info@aefu.ch
www.aefu.ch



oekoskop

Fachzeitschrift der Ärztinnen und
Ärzte für Umweltschutz (AefU)

Postfach 620, 4019 Basel, PC 40-19771-2

Telefon 061 322 49 49

E-Mail info@aefu.ch

Homepage www.aefu.ch

ÄRZTINNEN
UND ÄRZTE FÜR
UMWELTSCHUTZ
MEDECINS EN FAVEUR DE
L'ENVIRONNEMENT
MEDICI PER
L'AMBIENTE



Impressum

Redaktion:

- Stephanie Fuchs, leitende Redaktorin
AefU, Postfach 620, 4019 Basel, oekoskop@aefu.ch
- Dr. Martin Forter, Redaktor/Geschäftsführer AefU, Postfach 620, 4019 Basel

Papier: 100% Recycling

Gestaltung: Selina Kallen, hoi@selka.ch

Druck/Versand: Grempner AG, Basel/Pratteln

Abo: CHF 50 / erscheint viermal jährlich > auch für Nichtmediziner:innen

Die veröffentlichten Beiträge widerspiegeln die Meinung der Verfasser:innen und decken sich nicht notwendigerweise mit der Ansicht der Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU). Die Redaktion behält sich Kürzungen der Manuskripte vor. ©AefU

OEKOSKOP-Ausgaben ab 2012: online unter www.aefu.ch/oekoskop

AZB

CH-4019 Basel
P.P. / Journal

DIE POST

Adressänderungen: Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU), Postfach 620, 4019 Basel