Abschlussbericht

Teil II – Eingehende Darstellung

ZE: Prof. Dr. François Buscot, Dr. Christina Fasching, Dr. Thomas Reitz - Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) – Department Bodenökologie

Förderkennzeichen: 01DH21019

Vorhabensbezeichnung: **„RESCHEDULE - Resilient to Climate Change Extremes MeDiterranean AgricUltural Systems: Leveraging the Power of Soil Health and Associated Microbiota"**

„Resilienz Mediterraner Agrarsysteme gegenüber Klimawandel-Extremen: Die Kraft der Bodengesundheit und der assoziierten Mikrobiota"

Teilprojekt: Mikrobiom, Bodengesundheit und nachhaltige Landwirtschaft im Angesicht des Klimawandels im Mittelmeerraum

Laufzeit des Vorhabens: 36 Monate (+ 6 Monate kostenneutrale Verlängerung)

Berichtszeitraum: 06/2021 – 11/2024

1. Einleitung und Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der über den gesamten Zeitraum der Förderungsdauer von RESCHEDULE abgearbeiteten Arbeitspakete zusammengefasst, sowie die in der Vorhabenbeschreibung definierten Meilensteine ausgewertet.

In RESCHEDULE leitete das UFZ das Arbeitspaket 3 „Agrarökosystemmodellierung und DSS-Entwicklung“ (12 PM) und war wesentlich (20 PM) in das Arbeitspaket 2 „Entwicklung belastbarer Kleinbauern-Landwirtschaftssysteme“ eingebunden. Für beide Arbeitspakete wurden Daten in experimentellen Versuchsflächen der Projektpartner in Griechenland, Italien und Tunesien erhoben und ausgewertet. Zudem wurde der UFZ Projektstandort Bad Lauchstädt, speziell die „Global Change Experimental Facility“ (GCEF, https://www.ufz.de/index.php?en=40038) eingebunden, wo seit 2013 landwirtschaftliche Nutzungs- und Klima-Szenarien experimentell im Feld untersucht werden. Zudem war das UFZ mit je 2 PM auch in die drei weiteren Arbeitspakete (AP1 „Koordination und Projektmanagement“, AP4 „Sozioökonomie“ und AP5 „Dissemination und Kommunikation“) involviert.

Publikationen in Fachjournalen mit UFZ Beteiligung:

(1) Calvo, A.*, **Reitz, T**.*, Sillo, F., Montesano, V., Cañizares, E., Zampieri, E., Mahmoudi, Gohari, G., Chitarra, W., Giovannini, L., Conte, A., Mennone, C., Petruzzelli, G., Centritto, M., González-Guzmán, M., Arbona, V., Fotopoulos, V., Balestrini, R. (2025): Interactions between an arbuscular mycorrhizal inoculum and the root-associated microbiome in shaping the response of Capsicum annuum “Locale di Senise” to different irrigation levels. Plant and Soil 508 (1-2), 361 - 383. 10.1007/s11104-024-06806-4

(2) Ilahi, H., Calvo, A., Dhane, S., El Idrissi, M.M., Ouahmane, L., Alfeddy, M.N., **Reitz, T**., Sillo, F., Balestrini, R., Mnasri, B. (2025): Impact of bacterial inoculations on Pisum sativum L. biometric parameters and associated bacterial and AM fungal communities under semi-arid field conditions in Tunisia. Appl. Soil Ecol. 205, art. 105757. 10.1016/j.apsoil.2024.105757

(3) Zampieri, E., Sillo, F., Metelli, G., Cucu, M.A., Montesano, V., Quagliata, G., Philipp, L., Brescia, F., Conte, A., Giovannini, L., Mennone, C., Fiore, A., Astolfi, S., Savatin, D., Sestili, F., **Reitz, T.,** Balestrini, R. (2025): Insights into the influence of intercropping and arbuscular mycorrhizal inoculation on two modern durum wheat cultivars and their associated microbiota. Biol. Fert. Soils 61 (1), 85 - 107 10.1007/s00374-024-01872-3

(4) Bousselmi, W., Calvo, A., Gritli, T., Missbah El Idrissi, M., **Reitz, T.,** Sillo, F., Balestrini, R., Mnasri, B. (2025) Legume choice matters: different effects on Brassica napus

agronomic performance and root-associated bacterial communities in intercropping systems. Plant and Soil, https://doi.org/10.1007/s11104-025-07855-z

(5) Guimaraes, M.H., Sillo, F., Rozakis, S., Montesano, V., **Reitz, T.,** Isidoro, C., Oliveira, T., Paranychianakis, N., Balestrini, R. (xxxx) Durum Wheat Production in Italy – Challenges and Options to Improve Soil Health - under revision in: Land Use Policy

(6) Gritli, T., Toukebri, W., Kallala, N., Bousselmi, W., Missbah El Idrissi, M., **Reitz, T.,** Mnasri, B. (xxxx) Assessing bacterial community diversity in *Medicago sativa* grown in different geographic locations in Tunisia – under revision in: Symbiosis

Weitere Publikationen zu zeitlichen Dynamiken von mikrobiellen Gemeinschaften und Schlüsselarten werden aktuell angefertigt.

Entwicklung und Bereitstellung von „Know-how“:

(1) Decision Support System für nachhaltige Anbaumethoden mit Schwerpunkt auf Bodengesundheit: beta-Version verfügbar unter https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zenagropc.genagrotest1

2. Auswertung der Arbeitspakete inklusive wesentlicher Ergebnisse

Arbeitspaket 1 (2 PM)

Das AP1 fokussierte auf das Projektmanagement und die Koordination. Hierbei beteiligte sich das UFZ an der Auswahl der experimentellen Flächen, am Design von Feldexperimenten und an der Aufteilung der Analysen zwischen den Partnern.

RESCHEDULE untersuchte landwirtschaftliche Systeme an mehreren ausgewählten Standorten der Projektpartner in Italien, Griechenland, Tunesien und Deutschland (**AP1.1**). In Italien wurde der Versuchsstandort auf dem landwirtschaftlichen Betrieb „Azienda Agricola Pantanello“ in Metaponto (Provinz Matera, Region Basilikata) angelegt. Auf der Insel Kreta wurden mehrere repräsentative Felder in West- und Zentralkreta ausgewählt. In Tunesien wurden Versuchsflächen in verschiedenen Regionen untersucht, darunter im Norden (Zaghouan, Le Kef, Beja, Jendouba, Seliana, Borj Cedria und Mateur), im der Mitte des Landes (Enfidha, Kairouan, Sidi Bouzid und Kasserine) sowie im Süden (Gafsa, Gabes). In Deutschland wurden räumliche und zeitliche Daten zu wesentlichen Bodenparametern an der Global Change Experimental Facility (https://www.ufz.de/index.php?en=40038), einer Langzeitversuchseinrichtung des UFZ, erhoben. Die Analysenprotokolle wurden über alle Partner vereinheitlicht und das Vorgehen an die Protokolle von GeoBON (https://geobon.org/bons/thematic-bon/soil-bon/) angepasst **(AP1.2)**. Zudem wurde eine

Vereinbarung über die Aufgabenverteilung hinsichtlich der molekularen Biodiversitäts-analysen und der zu messenden bodenökologischen Summenparameter zwischen den Projektpartnern getroffen. Hinsichtlich der molekularen Analysen wurden Pipelines zur Auswertung der Sequenzdaten vom UFZ für alle Partner bereitgestellt (**AP1.3**). Das Design mit einem Überblick über die ausgewählten Flächen wurde auf der folgenden Webseite publiziert (https://www.reschedule.eu). Alle erhobenen Daten werden nach der initialen Verwendung für wissenschaftliche Veröffentlichungen im Open-Access Repository ZENODO (https://zenodo.org/) zur Verfügung gestellt (**AP1.4**).

Arbeitspaket 2 (20 PM)

Arbeitspaket 2 repräsentierte das umfangreichste Arbeitspaket für das UFZ im Rahmen von RESCHEDULE. Hier wurden amplikonbasierte Gemeinschaftsanalysen durchgeführt, um die Zusammensetzung und Diversität mikrobieller Gemeinschaften in den Böden der GCEF sowie der experimentellen Flächen der Projektpartner zu erfassen. Die Analyse basiert auf der Sequenzierung konservierter Markerregionen (16S rRNA für Bakterien und ITS für Pilze) und ermöglichte eine detaillierte Charakterisierung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften unter den verschiedenen Bewirtschaftungsformen, Bodenbedingungen und klimatischen Einflüssen (**AP2.1**). In diesem Teil des Arbeitspaketes nahm das UFZ eine zentrale Rolle ein, da hier nicht nur die Amplikon-Sequenzierungen für alle Projektpartner durchgeführt wurden, sondern auch die Datenauswertung mittels der am UFZ entwickelten Bioinformatik-Pipeline (https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa135) unterstützt wurde. Die Daten zeigten, dass sowohl die Diversität als auch die funktionelle Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften stark durch Standort, Nutzungssystem und Pflanzenbestand beeinflusst wurden. Beispielsweise wiesen Systeme mit Leguminosen-Zwischenfrüchten oder organischer Düngung eine signifikant höhere Diversität nützlicher Bodenmikroorganismen auf, insbesondere von arbuskulären Mykorrhizapilzen, Rhizobien und anderen mutualistischen Taxa. Diese Organismengruppen wurden auch mit erhöhter Bodenfruchtbarkeit, besserer Nährstoffmobilisierung und höherer mikrobieller Biomasse in Verbindung gebracht.

Neben den Gemeinschaftsanalysen wurde auch die Antwort ausgewählter biologischer Summenparameter des Bodens **(AP2.2)** auf Managementoptionen und Klima erfasst. Zur Einschätzung der Bodengesundheit wurden mikrobielle Biomasse, Atmung und Enzymaktivitäten als geeignete Indikatoren herangezogen. In der GCEF wurden beispielsweise in der Phase der höchsten Biomasseproduktion, die für landwirtschaftliche Erträge am relevantesten ist, stellten wir fest, dass konventionell bewirtschaftete Böden in den beiden oberen Bodenschichten eine höhere mikrobielle Biomasse aufwiesen als biologisch

bewirtschaftete Böden. Zukünftige klimatische Bedingungen hatten keinen Einfluss auf die mikrobielle Biomasse. In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen stellten wir fest, dass in der konventionellen Landwirtschaft die Bodenatmung, d. h. die Freisetzung des Treibhausgases CO_2, höher ist als in Böden aus ökologischer Landwirtschaft, während es in tieferen Bodenschichten keinen Unterschied zwischen den beiden Anbausystemen gab. Überraschenderweise war die Atmung in den tieferen Bodenschichten im Vergleich zu den Oberbodenschichten verstärkt, was mit der extremen Trockenheit im Oberboden zusammenhing. In den tieferen Bodenschichten war die Wasserverfügbarkeit höher, was die Bedeutung der tieferen Bodenschichten für die Funktion des Agrarökosystems unter Klimawandelbedingungen unterstreicht. Die Reaktion der extrazellulären Enzymaktivität auf die Bewirtschaftungs- und Klimabehandlungen war in der obersten Bodenschicht am meisten ausgeprägt. Auch hier beobachteten wir eine höhere Aktivität in der konventionellen Landwirtschaft im Vergleich zur ökologischen Landwirtschaft. Im Gegensatz zu Biomasse und Atmung hatte das zukünftige Klima leicht negative Auswirkungen auf die Enzymaktivitäten im Boden, wobei die negative Reaktion in der konventionellen Landwirtschaft stärker war als in der ökologischen Landwirtschaft.

Ein wesentliches Ziel in Arbeitspaket 2 war es, die Rolle der Gemeinschaftsstruktur und deren Funktion für Bodenprozesse, Boden- und Pflanzengesundheit und Produktivität zu verstehen (**AP2.3**). Dahingehend konnte beispielsweise in der RESCHEDULE Studie von Calvo *et al*. (2024), in der der Einfluss von arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen (AMF) auf die Wurzelmikrobiome von Paprika (*Capsicum annuum*) unter unterschiedlichen Bewässerungsbedingungen untersucht wurde, gezeigt werden, dass unter reduzierte Bewässerung eine AMF-Inokulation zu einer erhöhten mikrobiellen Diversität und verbesserten pflanzenphysiologischen Eigenschaften führte, ohne die Erträge zu beeinträchtigen. Dies unterstreicht die Bedeutung mikrobieller Gemeinschaften für die Anpassung von Pflanzen an Wasserstress und die Aufrechterhaltung der Bodengesundheit unter klimatischen Herausforderungen. In einer weiteren RESCHEDULE Studie von Zampieri *et al*. (2024) wurde der Einfluss von Zwischenfruchtanbau und AMF-Inokulation auf zwei moderne Hartweizensorten und deren assoziierte Mikrobiota untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl der Zwischenfruchtanbau mit Linsen als auch die AMF-Inokulation die mikrobielle Alpha-Diversität und Zusammensetzung, insbesondere der AMF-Gemeinschaften in den Wurzeln, beeinflussten. Dies deutet darauf hin, dass die geeignete Kombination von Pflanzenarten und mikrobiellen Inokulaten die bodenmikrobielle Gemeinschaft und somit die Bodengesundheit positiv beeinflussen kann. Die Studien belegen, dass die gezielte Förderung mikrobieller Gemeinschaften durch landwirtschaftliche Praktiken, Zwischenfruchtanbau und mikrobielle Inokulationen die Bodengesundheit verbessern und zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft, z.B. mit reduzierter Bewässerung, beitragen können.

Arbeitspaket 3 (10 PM)

Das Arbeitspaket 3 des Projektes widmete sich der integrativen Modellierung von Bodendaten zur Ableitung nachhaltiger Managementoptionen sowie der Entwicklung eines anwenderfreundlichen „Decision Support Systems“ (DSS), das Landwirtinnen und Landwirte bei der Auswahl lokal angepasster Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bodengesundheit unterstützt.

Im **AP3.1** lag der Fokus auf der Modellierung bodenbiochemischer Kreisläufe, die vom Projektpartner aus Kreta durchgeführt wurde. Hier wurden bodenphysikalische und biogeochemische Parameter den Feldexperimenten genutzt, um Prozesse des Kohlenstoff- und Stickstoffkreislaufs sowie Veränderungen in der Bodenstruktur auf der Feldskala zu parametrisieren. Das UFZ übernahm im Rahmen von **AP3.3** die Leitung bei der Auswertung und Modellierung der mikrobiellen Gemeinschaften. Dazu wurden umfangreiche Daten, die in den Jahren 2022 und 2023 im Rahmen des AP2 gesammelt worden waren, hinsichtlich der biologischen Summenparameter (z. B. mikrobielle Biomasse, Enzymaktivitäten) sowie amplikonbasierter mikrobieller Gemeinschaftsdaten analysiert. Ziel war es, wechselseitigen Zusammenhänge zwischen mikrobieller Gemeinschaftsstruktur, Bodenzustand und agrarökologischen Managementfaktoren herzustellen. Ein zentraler Output dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung einer Analysepipeline für sogenannte Schlüsselarten, die am Beispiel der GCEF Daten im *Meilenstein 6* detailliert beschrieben ist. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Entwicklung eines Decision Support Systems (DSS) ein (**AP3.2**) die Anwenderinnen und Anwender bei der Wahl nachhaltiger Anbaustrategien unterstützt. Die softwaretechnische Umsetzung des DSS (**AP3.4**) erfolgte durch den griechischen Partner ZEN AGRO PC wobei dafür auch Farmer und landwirtschaftliche Entscheidungsträger aktiv im Rahmen von lokalen Workshops in Tunesien, Griechenland und Italien in die Entwicklung eingebunden wurden (siehe AP4).

Arbeitspaket 4 (2 PM)

Das Arbeitspaket 4 zielte auf die aktive Einbindung lokaler Akteure, insbesondere kleiner landwirtschaftlicher Betriebe aus dem Mittelmeerraum, ab. Hier ging es maßgeblich darum, adaptive Bewirtschaftungsempfehlungen zu entwickeln, die zur langfristigen Erhaltung von Ökosystemdienstleistungen beitragen und die Resilienz der Produktionssysteme unter veränderten Umwelt- und Klimabedingungen stärken UND für die lokalen Bäuerinnen und Bauern umsetzbar sind. Dabei war das UFZ aktiv an der Durchführung und Auswertung von Workshops beteiligt (**AP4.1**), die von der University of Évora (Portugal) in Griechenland, Italien und Tunesien organisiert wurden.

Local Farmer/Stakeholder Workshops:

(1) Metaponto (Italy) – 22.05.2024

(2) Tunis (Tunisia) – 06.06.2024

(3) Chania (Crete, Greece) – 09.10.2024

Diese Workshops dienten einerseits der Kommunikation der Projektziele aber vor allem der Diskussion der identifizierten Optimierungsansätze. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Arbeitspaketen 2 und 3 wurden durch das UFZ praxistaugliche, Empfehlungen formuliert (*Meilenstein 5*). Diese Empfehlungen umfassten folgende grundlegende Maßnahmen: Der Einsatz von Zwischenfrüchten, insbesondere von Leguminosen), eine reduzierte Bodenbearbeitung, adaptierte Fruchtfolgen mit tief wurzelnden Arten, organische Düngung (z. B. Kompost, Stallmist, Biokohle), sowie die Inokulation mit nützlichen Mikroorganismen, wie Mykorrhiza oder Rhizobien. Diese Maßnahmen wurden in den Workshops diskutiert und auf ihre Umsetzbarkeit überprüft, wobei eine systematische Erfassung technischer und sozioökonomischer Rahmenbedingungen und Zwänge, denen kleine landwirtschaftliche Betriebe in diesen Regionen unterliegen, erfolgte. Die Rückmeldungen der Landwirte flossen direkt in die Entwicklung der DSS Software ein, z.B. bei der Auswahl von einfach erfassbaren Bodenparameter und -indikatoren oder praktikabler Managementoptionen. Im Anschluss an die Workshops erfolgte in **AP4.2** eine Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener nachhaltiger Bewirtschaftungsstrategien. Die Einbindung der Perspektive der Landwirte sowie die Berücksichtigung realer wirtschaftlicher Restriktionen waren zentrale Elemente dieses Teilpakets.

Arbeitspaket 5 (2 PM)

Im Arbeitspaket 5 beteiligte sich das UFZ intensiv an der internen Kommunikation im RESCHEDULE Konsortium sowie an der Verbreitung der Projektergebnisse (**AP5.1**). Für die interne Kommunikation gab es jährliche Präsenztreffen unter Teilnahme des UFZ (Juli 2022 in Turin – Italien, Juli 2023 in Chania – Kreta, Juni 2024 in Hammamet – Tunesien). Darüber hinaus fanden im Projektverlauf zahlreiche Online-Treffen statt, die auf gegenseitige Updates und die Koordination anstehender Aktivitäten im Gesamtverbund abzielten. Die gemeinsame Datenauswertung erfolgte größtenteils in zusätzlichen bilateralen Gesprächen mit den Partnerinstitutionen. Zur Förderung der Kapazitätsbildung wurden durch das UFZ insgesamt acht Online-Kurse für die Projektpartner organisiert, die sich mit bioinformatischen Auswertemethoden von Amplikon-Sequenzierdaten, sowie zur Analyse von mikrobiellen Netzwerken und Schlüsselarten befassten. Darüber hinaus war das UFZ maßgeblich an der Organisation und inhaltlichen Ausgestaltung der internationalen wissenschaftlichen Konferenz „Soil Health: Current Status and Future Needs“ im Oktober 2024

(https://healthsoil.org/) beteiligt, unter anderem durch Organisation und Leitung von Sessions sowie mit fünf eigenen wissenschaftlichen Beiträgen wodurch zentrale Projektergebnisse zur internationalen Sichtbarkeit und wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit von RESCHEDULE (**AP 5.2**) beigetragen haben.

3. Finale Auswertung der Meilensteine unter Einordnung der Erkenntnisse im Kontext des aktuellen Kenntnisstandes auf dem Gebiet des Vorhabens

M1: Festlegung der Flächen Bad Lauchstädt, sowie Implementierung von Treatments in den Versuchsflächen

Für RESCHEDULE wurden die Ackerbauflächen der GCEF, welche eine für die Region typische konventionelle bzw. ökologische Bewirtschaftung umfassen als repräsentative Systeme für eine intensive bzw. extensive Feldbewirtschaftungsform ausgewählt. Zusätzlich erlaubt die GCEF, die Untersuchung dieser Systeme unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen. Alle insgesamt 20 Flächen wurden im Jahr 2022 und 2023 zu ökologisch zentralen Zeitpunkten beprobt (frühe Vegetationsphase, Peak-Biomasseproduktion, Reifestadium). Dabei wurde 2022 neben dem Boden auch gezielt die Rhizosphäre, sowie die Wurzeln der Gerste beprobt. Die Proben (2022: n=180; 20 Plots x 3 Zeitpunkte x 3 Kompartimente, 2023: n= 80; 20 Plots x 4 Zeitpunkte) wurden auf ihre chemischen (pH, C, N, P, K) und biologischen Summenparameter (Sequenzierung der bakteriellen und pilzlichen Gemeinschaft, Enzymaktivitäten) untersucht. Die Ergebnisse zeigen hohe zeitliche Dynamiken der mikrobiellen Gemeinschaften insbesondere in der Rhizosphäre. Diese Dynamiken werden durch Management (konventionell versus ökologisch) und Klimabehandlung (gegenwärtiges versus zukünftiges Klima) beeinflusst. Die Ergebnisse deuten unter anderem darauf hin, dass künftige Klimabedingungen zu einer erhöhten Bodenatmung (d. h. zu erhöhten CO_2-Emissionen), aber zu einer verringerten Enzymaktivität im Boden (d. h. zu einer Verlangsamung des Nährstoffkreislaufs) führen könnten. Diese und andere bodenökologischen Parameter zeigen jahreszeitliche sowie bewirtschaftungsabhängige Muster. Die vorliegenden Daten zeigen, dass die ökologische im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung zu einem geringeren, aber stabileren Stoffumsatz im Boden unter Klimawandelbedingungen führt. Die Daten zu den mikrobiellen Gemeinschaften spiegeln die identifizierten Muster der Stoffumsätze im Boden wider und implizieren, dass eine ökologische Bewirtschaftung, im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft, stabilere Gemeinschaftsstrukturen hervorruft. Zwei Publikationen zu diesen Daten werden aktuell angefertigt.

M2: Klimawandelszenarien und Managementpraktiken für Modellierung festgelegt

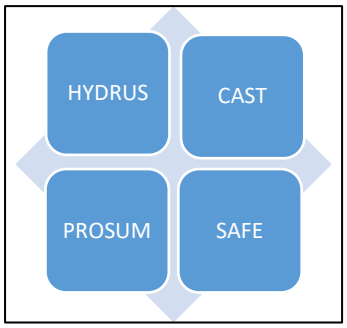
Neben den in der GCEF experimentell simulierten Klimawandel, d.h. +0.55°C Durchschnittserwärmung und Veränderung des Regenmusters (10% mehr Regen im Frühjahr und Herbst, 20% weniger Regen im Sommer), wurden die Klimawandelszenarien RCP2.6 und RCP8.5 als Grundlage für die Modellierungsarbeiten herangezogen. Diese Szenarien repräsentieren zwei kontrastierende Entwicklungspfade: Während RCP2.6 ein mildes Szenario unter starken Klimaschutzmaßnahmen abbildet (ähnlich der GCEF), beschreibt RCP8.5 einen „business-as-usual"-Pfad mit ungebremsten Emissionen und maximalen Auswirkungen auf Umwelt und Agrarsysteme. Die Auswahl dieser beiden Szenarien ermöglicht eine realistische Spannbreite zukünftiger Klimabedingungen im Mittelmeerraum abzubilden, angefangen von ambitionierter Minderung bis hin zum „worst-case".

Die gewählten landwirtschaftlichen Managementsysteme waren an die experimentellen Ansätze der einzelnen Projektpartner gekoppelt. Dabei wurde stets ein „Business-as-usual"-Szenario, welches die in der jeweiligen Region vorherrschende konventionelle Praktik abbildet, mit mehreren alternativen Managementsystemen verglichen. Letzteren Systeme beinhalteten Praktiken zu adaptierten Fruchtfolgen, Zwischenfruchtanbau (speziell Leguminosen), angepasste Düngeformen und Mengen, eine reduzierte Bodenbearbeitung und die Inokulierung mit pflanzenwachstumsfördernden Mikroorganismen (Rhizobien, Mykorrhiza). Die Maßnahmen wurden ausgewählt, weil sie sich relativ einfach in bestehende Produktionssysteme integrieren lassen und ein hohes Potential zur Bodenverbesserung aufweisen.

M3: Fertigstellung des ökologischen Konzeptes um Klimawandelfolgen auf Böden des Mittelmeerraums zu bewerten

Im Rahmen von RESCHEDULE wurde eine umfassende Analyse zur Reaktion zentraler Ökosystemdienstleistungen, wie Produktivität, Biodiversität und Bodengesundheit, auf unterschiedliche landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie zukünftige Klimawandelszenarien durchgeführt. Die Analyse integrierte dabei sowohl die Bedingungen in der GCEF, was einer sehr geringen Veränderung entspricht) als auch klimatische Standardszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) um Veränderungen in der Bodenstruktur, organischen Substanz, biologischen Aktivität und Wasserdynamik unter zukünftigen Bedingungen abzuschätzen. Dabei wurde auf Funktionen wie Kohlenstoffspeicherung, Nährstoffkreisläufe, mikrobielle Diversität und Bodenwasserhaushalt fokussiert, da sie maßgeblich für die Resilienz der Systeme gegenüber Trockenstress, Erosion und Bodendegradation sind. Besonderes Augenmerk galt dabei dem Mittelmeerraum, der als Hotspot des Klimawandels gilt. Modellierungen zeigen, dass dort die Winterniederschläge um bis zu 40% zurückgehen könnten, was die Wasserverfügbarkeit und Bodenfeuchte erheblich

einschränkt und die landwirtschaftliche Produktivität gefährdet. Gleichzeitig nehmen Extremereignisse wie Hitzewellen, Starkregen oder Dürreperioden in Häufigkeit und Intensität zu und wirken oft in Kombination, was Ertragseinbußen von bis zu 30% zur Folge haben kann. Für die Projektionen wurden unterschiedliche Pfade berücksichtigt: Während RCP 2.6 eine moderate Erwärmung bei globalen Klimaschutzmaßnahmen beschreibt, stellt RCP 8.5 ein ungebremstes Szenario mit deutlich stärkeren Auswirkungen dar. Simulationen mit dem 1D-ICZ-Modell verdeutlichten, dass die Sequestrierung organischer Substanz entscheidend von Managementmaßnahmen, Standortklima und Zeit abhängt. Ergebnisse aus dem GCEF belegten zudem, dass bereits moderate Manipulationen (z. B. +0,6°C Erwärmung, −20 % Sommerniederschlag) deutliche Veränderungen in der Dynamik mikrobieller Gemeinschaften und biogeochemischer Prozesse hervorrufen. Diese Befunde unterstreichen die hohe Empfindlichkeit von Böden gegenüber Extremereignissen und verdeutlichen die Dringlichkeit angepasster Managementstrategien, die die Resilienz traditioneller Anbausysteme stärken. Das erstellte Konzept diente als wissenschaftliche Grundlage für die Szenarienanalyse im Decision Support System (DSS) und ermöglichte es, empfohlene Managementmaßnahmen hinsichtlich ihrer ökologischen Wirksamkeit im Klimawandelkontext zu bewerten.



The 1D-ICZ model consists of sub-models that allow the projection of SOM sequestration (or losses) in response to climate. The hydrology is simulated through the Hydrus model, which specifically tracks the flow of water and heat, and solute transport. Soil weathering and element concentrations are simulated with the SAFE model. The PROSUM model is used to simulate plant growth, water, and nutrient uptake, and litter production (above- and below). CAST: Soil C biogeochemical modelling is performed with the CAST model (Giannakis et al., 2014, https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.027)

M4: Umfassende Zusammenstellung der Reaktion von Ökosystemdienstleistungen auf verschiedene Managementpraktiken und auf den Klimawandel

Im Rahmen von RESCHEDULE wurden Reaktionen von Ökosystemprozessen und Dienstleistungen auf den Klimawandel sowie auf angepasste Managementpraktiken umfassend zusammengestellt.

Die Analyse zeigte, dass zukünftige Klimabedingungen zentrale Ökosystemfunktionen erheblich verändern werden. Steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und die zunehmende Häufigkeit von Extremereignissen wirken direkt auf die Dynamik der organischen Substanz im Boden: erhöhte Temperaturen beschleunigen mikrobielle Zersetzungsprozesse, während Dürreperioden den Eintrag frischer Biomasse verringern und damit langfristig zu Kohlenstoffverlusten führen. Auch die Nährstoffkreisläufe werden destabilisiert: Trockenheit reduziert die mikrobielle Aktivität und verlangsamt Mineralisierungsprozesse, wohingegen Starkregenereignisse die Nitratauswaschung und

Denitrifikation fördern können. Hinzu kommt, dass Bodenmikroorganismen als besonders empfindliche Komponenten des Ökosystems stark auf Temperatur- und Feuchteänderungen reagieren, was zu einem Rückgang von Biomasse, Diversität und funktioneller Stabilität führen kann. Gleichzeitig werden Wasserhaltevermögen und Infiltrationsraten geschwächt, wodurch Risiken für Bodenerosion, Nährstoffverluste und Ertragseinbußen deutlich steigen. Diese Prozesse wirken sich auch auf die Klimawirkung der Landwirtschaft aus, da sich das Emissionsverhalten von CO_2, N_2O und CH_4 unter diesen Bedingungen verschiebt.

Im Gegensatz dazu konnten eine Reihe von landwirtschaftlichen Managementstrategien identifiziert werden, die das Potenzial besitzen, diese negativen Effekte abzumildern und die Resilienz von Agrarsystemen zu erhöhen. Dazu gehören etablierte Maßnahmen wie der Einsatz von Zwischenfrüchten, reduzierte Bodenbearbeitungssysteme und vielfältige Fruchtfolgen, die sowohl die Bodenstruktur als auch die mikrobielle Vielfalt fördern. Ebenso wirkungsvoll sind organische Zusätze wie Kompost, Stallmist oder Biokohle, die den Humusgehalt erhöhen, die Nährstoffpufferung verbessern und langfristig zur Kohlenstoffsequestrierung beitragen. Ergänzend dazu bieten mikrobielle Inokulationen (z. B. mit Mykorrhizapilzen oder stickstofffixierenden Bakterien) innovative Ansätze, um Pflanzenernährung und Stresstoleranz gezielt zu verbessern. Darüber hinaus haben sich Agroforstsysteme, sowie effiziente Bewässerungstechniken (z.B. Tropfbewässerung, Wassererntesysteme) und Mulchverfahren als besonders vielversprechend erwiesen, um Mikroklima, Wassernutzungseffizienz und Bodenfruchtbarkeit unter Hitzestress und Trockenheit zu stabilisieren. Diese Praktiken tragen insgesamt dazu bei, Kohlenstoff im Boden zu speichern, die Funktionsvielfalt mikrobieller Gemeinschaften zu erhalten und Erträge auch unter Stressbedingungen abzusichern.

Neben zahlreichen Effekten, die im Einklang mit aktueller Literatur stehen, lieferte RESCHEDULE wesentliche neue Erkenntnisse über Bodenprozesse in mediterranen Agrarökosystemen, sowie über das Wirkpotenzial angepasster Managementstrategien. Besonders hervorzuheben sind:

- Die modellgestützte Projektion von Bodenkohlenstoffvorräten in Deutschland, Griechenland und Italien unter den Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 zeigt einen signifikanten Rückgang der Vorräte, insbesondere unter RCP8.5. Ein stabilisierender Effekt lässt sich nur durch kombinierte Maßnahmen wie reduzierte Bodenbearbeitung, ökologische Bewirtschaftung und die gezielte Applikation organischer Bodenverbesserungsmittel (z.B. Kompost, Biokohle) erzielen.
- Ein Verzicht auf Bodenbearbeitung führt zu einer signifikanten Anreicherung von organischer Substanz im Oberboden, jedoch ohne tiefgreifende Veränderungen in der Zusammensetzung mikrobieller Gemeinschaften. Dies unterstreicht den starken

Einfluss von standortspezifischen Umweltbedingungen und landnutzungshistorischen Effekten auf die Struktur des Bodenmikrobioms.

- Die Bakteriengemeinschaften in Böden des Mittelmeerraums zeigten starke saisonale Schwankungen, unter anderem mit einer Anreicherung von thermotoleranten und thermophilen Taxa im Sommer. Diese Veränderungen in der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft hat direkte Auswirkungen auf den Kohlenstoffhaushalt, insbesondere unter den Bedingungen des semiariden Klimas, wie es z. B. in Tunesien vorherrscht. In Laborstudien wurden aus diesen Gemeinschaften mehrere pflanzenfördernde Bakterienstämme isoliert und erfolgreich auf ihr Potenzial getestet, abiotischen Stress (Hitze, Salz, Trockenheit) zu mildern sowie Phosphor- und Stickstoffverfügbarkeit für Nutzpflanzen zu verbessern. Diese Stämme könnten zukünftig gezielt für mikrobielle Inokulationen durch Verbesserung der Trockenresistenz von Pflanzen im Agrarsystem genutzt werden.
- Gleichzeitig wurde eine bisher nicht bekannte Quelle von N_2O-Emissionen während der Bewässerung von nicht gepflügten Böden identifiziert. Dieser Beitrag wird bisher in Treibhausgasbilanzen nicht berücksichtigt, könnte aber im Kontext der Klimabilanz landwirtschaftlicher Systeme in der Zukunft hochrelevant sein.
- Diese Ergebnisse zeigen gemeinsam mit den Farmer- Workshops, dass angepasste Managementsysteme (Zwischenfruchtanbau mit Leguminosen, reduzierte Bodenbearbeitung, mikrobielle Inokulationen, organische Düngung und Fruchtfolgendiversifikation) nicht nur ökologisch sinnvoll und klimaresilienz-fördernd, sondern auch praktikabel und mit moderatem Aufwand in bestehende Bewirtschaftungssysteme integrierbar, sind. Sie stellen somit effektive Hebel zur Erhaltung und Verbesserung landwirtschaftlicher Ökosystemdienstleistungen unter den Herausforderungen des Klimawandels dar.

Ergänzend zu den Erkenntnissen gewinnen adaptive Managementinstrumente an Bedeutung: Entscheidungsunterstützungssysteme (DSS) und digitale Anwendungen erlauben es Landwirten, schnell auf aktuelle Wetterextreme zu reagieren und Managementmaßnahmen flexibel anzupassen. Auf diese Weise kann der Übergang von einer reaktiven hin zu einer proaktiven Anpassung unterstützt werden, die dazu beiträgt, Ökosystemdienstleistungen zu sichern, Ertragseinbußen zu minimieren und Ressourcen effizient zu nutzen.

M5: Fertigstellung adaptiver Managementempfehlungen zur Erhaltung von Ökosystemdienstleistungen und zur Erzeugung von resilienten Bewirtschaftungssystemen für Farmer im Mittelmeerraum

Im Rahmen von RESCHEDULE wurden in Italien, Griechenland und Tunesien verschiedene angepasste Bewirtschaftungsszenarien implementiert und verglichen, um Strategien zur Erhaltung bodengebundener Ökosystemdienstleistungen und zur Steigerung der Klimaresilienz landwirtschaftlicher Systeme zu identifizieren. In Italien wurden unterschiedliche Hartweizensysteme untersucht, von der konventionellen Produktion bis hin zu Mischkulturen mit Linsen und dem Einsatz biobasierter Produkte (z. B. AMF-Inokulanten). In Griechenland lag der Fokus auf dem Olivenanbau, wobei Praktiken wie reduzierte Bodenbearbeitung, Ausbringung von Biokohle und der Zwischenfruchtanbau mit lokalen Leguminosen erprobt wurden. In Tunesien wurden verschiedene Fruchtfolgesysteme auf Basis von Getreide, Leguminosen und Raps getestet, um die Bodenfunktionen unter semi-ariden Bedingungen zu optimieren.

<u>Szenarien - Italien:</u>

1. Konventioneller Anbau von Hartweizen (mit anorganischen Düngemitteln gedüngt)
2. Anbau von Hartweizen ohne anorganische Düngung
3. Anbau von Hartweizen unter Verwendung biobasierter Produkte (AMF-Impfstoffe)
4. Anbau von Hartweizen in Mischkultur mit Linsen
5. Hartweizenanbau in Mischkultur mit Linsen und Anwendung biobasierter Produkte (AMF-Inokulate) auf Hartweizen-Genotypen
6. Hartweizenanbau in Mischkultur mit Linsen und Anwendung biobasierter Produkte (AMF-Inokulate) auf Linsen

<u>Szenarien - Griechenland:</u>

1. Konventioneller Olivenanbau
2. Olivenanbau ohne Bodenbearbeitung
3. Olivenanbau mit Ausbringung von Biokohle, hergestellt aus Nebenprodukten der Olivenölmühle
4. Olivenanbau mit Einsatz eines Häckslers
5. Olivenanbau mit Zwischenfruchtanbau lokaler Hülsenfrüchte (*Vicia ervilia*)
6. Olivenanbau ohne Bodenbearbeitung mit Ausbringung von Biokohle

<u>Szenarien - Tunesien:</u>

1. Konventioneller Getreideanbau
2. Getreide-Hülsenfrüchte-Fruchtfolge
3. Getreide-Raps Fruchtfolge
4. Getreide-Hülsenfrüchte-Raps-Fruchtfolge

Der länderübergreifende Vergleich dieser Szenarien lieferte zentrale Erkenntnisse darüber, welche Maßnahmen besonders geeignet sind, zentrale Ökosystemfunktionen wie Nährstoffkreisläufe, Kohlenstoffbindung und die biologische Vielfalt der Böden unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen zu unterstützen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine Abkehr von konventioneller Bewirtschaftung hin zu stärker diversifizierten und biologisch aktivierenden Systemen (z. B. erweitere Fruchtfolgen, Einsatz organischer Bodenverbesserer, reduzierte Bodenbearbeitung) die Widerstandsfähigkeit der Systeme erhöhen und eine bessere Anpassung an den Klimawandel ermöglichen kann. Diese praxisnahen Managementempfehlungen wurden sowohl in Workshops mit Landwirten kommuniziert als auch in das im Projekt entwickelten, über eine App nutzbare, Decision Support System integriert.

M6: Bericht zur wechselseitigen Abhängigkeit von Bodengesundheit und Mikroorganismen inklusive der Identifizierung von Schlüsselarten

Die nachhaltige Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden steht in enger Verbindung mit der Funktion und Diversität mikrobieller Gemeinschaften. Mikrobielles Leben im Boden spielt eine zentrale Rolle für wesentliche Ökosystemfunktionen wie Nährstoffkreisläufe, Krankheitsunterdrückung und die Anpassungsfähigkeit an klimatische Stressoren. Im Rahmen von RESCHEDULE wurde diese wechselseitige Abhängigkeit zwischen Bodengesundheit und Mikroorganismen unter realistischen Anbaubedingungen intensiv untersucht. Besondere Beachtung fanden dabei sogenannte Schlüsselarten, die überproportional zur ökologischen Stabilität beitragen können. Im Projekt wurde zunächst ein Set von Indikatoren definiert, anhand derer sich die Bodengesundheit bewerten lässt. Dazu zählen insbesondere Gehalte an organischer Substanz, Bodenstruktur und Aggregatstabilität, pH-Wert, Nährstoffverfügbarkeit, biologische Aktivität sowie die Wasserhaltekapazität. Die Untersuchungen zeigten klar, dass nachhaltige Bewirtschaftungsformen wie reduzierte Bodenbearbeitung, vielfältige Fruchtfolgen, organische Zusätze (Kompost, Stallmist, Biochar) oder Zwischenfrüchte diese Indikatoren in der Regel verbessern, während intensive Bodenbearbeitung, Monokulturen oder ein hoher Einsatz von mineralischen Düngern und Pestiziden gegenteilige Effekte haben können.

Besonders intensiv wurde der Zusammenhang zwischen Bodenmikroorganismen und Bodengesundheit betrachtet. Mikrobielle Gemeinschaften sind Triebkräfte zentraler Ökosystemfunktionen weil sie den Abbau organischer Substanz, die Stickstoff- und Phosphordynamik, die Aggregatbildung und die Krankheitsunterdrückung steuern. RESCHEDULE konnte zeigen, dass bestimmte Managementmaßnahmen wie reduzierte Bodenbearbeitung, organische Düngung oder die Inokulation mit Mykorrhizapilzen und stickstofffixierenden Bakterien gezielt funktionelle Gruppen fördern. Beispiele aus den

Feldversuchen in Italien und Griechenland belegen, dass die Inokulation mit arbuskulären Mykorrhizapilzen (AMF) die Diversität im Wurzelmikrobiom erhöhen und die Toleranz gegenüber Trockenstress verbessern kann, ohne dass Ertragseinbußen entstehen. Auch der Zwischenfruchtanbau mit Leguminosen trug zur Anreicherung funktioneller Gruppen bei und unterstützte die Nährstoffeffizienz.

Gleichzeitig zeigte sich die starke Kontextabhängigkeit dieser Effekte: Standortbedingungen wie Bodentyp, Klima, Landnutzungsgeschichte oder angebautes Kulturpflanzenspektrum beeinflussten maßgeblich, wie Managementmaßnahmen auf die mikrobielle Diversität und Funktionalität wirkten. Während an nördlicheren Standorten vor allem Managementeffekte erkennbar waren, dominierten in südlicheren Regionen saisonale Extreme wie Hitze und Dürre, die die Wirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen teilweise überlagerten. Die GCEF-Studien in Deutschland bestätigten diesen Befund: Während moderate Klimaänderungen nur geringe Verschiebungen in der Funktionalität der Bodenmikroben verursachten, führten extreme Ereignisse zu tiefgreifenden und nachhaltigen Veränderungen.

Ein zentrales Ergebnis von RESCHEDULE war die Identifikation sogenannter „Keystone Taxa“. Dabei handelt es sich um Mikroorganismen, die trotz geringer relativer Häufigkeit eine Schlüsselrolle in mikrobiellen Netzwerken einnehmen und für Stabilität und Funktionalität des gesamten Systems entscheidend sind. Mit einer am UFZ entwickelten Pipeline konnten anhand von Netzwerkmetriken (Degree, Closeness, Betweenness) solche Schlüsselarten in den verschiedenen Feldversuchen systematisch identifiziert werden. Die Analysen zeigten, dass die Zusammensetzung der Keystone Taxa stark von Management und Klimabedingungen abhing. Organische Systeme förderten eine größere Vielfalt und Interaktion von Schlüsselarten, während konventionelle Systeme stärker auf wenige dominante Gruppen fokussiert waren. Unter zukünftigen Klimabedingungen verschoben sich die funktionellen Schwerpunkte dieser Taxa: Während unter aktuellen Bedingungen vor allem Stickstofffixierer, Ammoniakoxidierer und Pathogenkontrollorganismen dominierten, waren unter Stressszenarien vermehrt Destruenten und chitinabbauende Gruppen zentral.

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass Bodengesundheit und Resilienz nicht nur von der Gesamtdiversität, sondern in besonderem Maße von der Präsenz und Stabilität einzelner Schlüsselorganismen abhängen. RESCHEDULE hat mit der Identifikation dieser Taxa und der Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden einen wichtigen Beitrag dazu geleistet, mikrobiologische Prozesse für die Bewertung und Steuerung nachhaltiger Bewirtschaftung nutzbar zu machen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der Fördermittel sowie der geleisteten Projektarbeiten

Die Fördermittel wurden überwiegend für Personalstellen, sowie für Verbrauchsmittel für Laboranalysen und Feldkampagnen verwendet. Der größte Ausgabenblock entfiel auf die Personalkosten, die die Durchführung der Probenahmen, Labormessungen und Modellierungen ermöglichten. Wesentliche Sachmittel flossen in DNA-Sequenzierungen, enzymatische Analysen und die logistische Unterstützung der Feldkampagnen im GCEF. Die Ausgaben entsprachen den Vorgaben des Antrags und waren sachlich notwendig und angemessen.

Die im Rahmen von RESCHEDULE durchgeführten Arbeiten waren in hohem Maße notwendig, um die Projektziele zu erreichen und belastbare Grundlagen für die Bewertung von Bodengesundheit unter Klimawandelbedingungen zu schaffen. Ein zentrales Element war dabei die umfangreiche molekularbiologische Charakterisierung der mikrobiellen Gemeinschaften in der GCEF, aber auch in den verschiedenen Experimenten der Projektpartner. Die hierfür erforderlichen Sequenzierungen verursachten zwar einen erheblichen finanziellen Aufwand, waren jedoch unverzichtbar, da nur auf dieser Basis die Struktur und Funktion mikrobieller Netzwerke unter unterschiedlichen Bewirtschaftungs- und Klimabedingungen präzise erfasst werden konnten. Insbesondere die Identifikation von Schlüsselarten, sowie die Analyse von Diversitätsmustern und funktionellen Gruppen (z. B. Stickstofffixierer, Mykorrhizapilze, Destruenten), wäre ohne diese tiefgehenden Sequenzdaten nicht möglich gewesen.

Gerade vor dem Hintergrund, dass mikrobielle Gemeinschaften extrem sensibel auf Klimavariablen wie Temperatur, Niederschlag und Extremereignisse reagieren, war es notwendig, hochauflösende und vergleichbare Datensätze aus allen beteiligten Standorten (Deutschland, Italien, Griechenland, Tunesien) zu generieren. Nur durch diese umfassende Abdeckung konnte gezeigt werden, wie stark die Reaktionen von Standortbedingungen und Managementmaßnahmen abhängen, und in welchem Maße Klimastress mikrobiologische Funktionen destabilisiert.

Die Sequenzierungen wurden flankiert durch umfangreiche Feldexperimente im GCEF, durch Messungen von Bodengesundheitsparametern, durch Modellierungen sowie durch enge Interaktion mit Landwirten und politischen Stakeholdern im Rahmen von Workshops. Diese methodische Kombination war erforderlich, um einerseits die mikrobiologischen Mechanismen im Detail zu verstehen und andererseits praxisnahe Indikatoren und Managementempfehlungen abzuleiten. Die erzielten Ergebnisse belegen die hohe Relevanz und Angemessenheit des gewählten Ansatzes und rechtfertigen den Ressourceneinsatz vollumfänglich.

5. Verwertbarkeit der Ergebnisse (wirtschaftliche, technische und wissenschaftliche Erfolge)

Das RESCHEDULE-Projekt hat im Einklang mit seinen ursprünglichen wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Zielen bedeutende Erfolge erzielt und legt zugleich die Grundlage für nachhaltige Wirkungen über die Projektlaufzeit hinaus. Die erzielten Fortschritte betreffen sowohl die wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung als auch die technologische Entwicklung, den Kapazitätsaufbau sowie wirtschaftliche und gesellschaftliche Perspektiven in der Mittelmeerregion und darüber hinaus.

Wissenschaftlicher Erfolg

Die Forschung im Rahmen von RESCHEDULE hat substanzielle neue Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen Bodenmikrobiomen, Pflanzengesundheit und landwirtschaftlichem Management unter Bedingungen des Klimawandels geliefert. Bislang wurden vier Fachartikel in international renommierten Zeitschriften (Plant and Soil, Applied Soil Ecology, Biology and Fertility of Soils) veröffentlicht, zwei Manuskripte befinden sich in Überarbeitung, fünf weitere sind in Vorbereitung. Beispielhafte Ergebnisse zeigen, wie die Inokulation mit arbuskulären Mykorrhizapilzen sowie der Einsatz von Zwischenfrüchten positive Effekte auf Ertrag, Bodenstruktur und mikrobielle Gemeinschaften unter semiariden Bedingungen ausüben können.

Darüber hinaus hat RESCHEDULE methodische Fortschritte erzielt, insbesondere durch die Entwicklung einer standardisierten Pipeline zur Identifikation mikrobieller Schlüsselarten, die bereits auf Daten aus Deutschland und Italien angewendet wurde. Diese Pipeline fördert die Vergleichbarkeit zwischen Standorten und Partnerländern und erlaubt eine modellbasierte Charakterisierung robuster mikrobieller Indikatoren der Bodengesundheit, was ein zentrales Projektziel darstellte

Parallel dazu wird an der Entwicklung von Agrarökosystemmodellen gearbeitet, die biologische, chemische und physikalische Bodenparameter in verschiedenen Klimaszenarien integrieren. Diese Modelle verbessern das Verständnis biogeochemischer Kreisläufe und sollen innerhalb von 36 Monaten nach Projektabschluss in hochrangigen Fachjournalen publiziert werden.

Technologische Erfolge und Kapazitätsaufbau

Eine Schlüsselinnovation stellt das benutzerfreundliche Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) dar, das derzeit in einer öffentlich zugänglichen Beta-Version getestet wird. Es ermöglicht die Ableitung kontextbezogener Managementempfehlungen zur Förderung der

Bodengesundheit und Anpassung an den Klimawandel. Die Entwicklung dieses Systems erfolgte partizipativ mit Stakeholdern aus drei Mittelmeerländern und spiegelt somit die Praxisnähe und Anwendungsorientierung des Projekts wider. Die Organisation einer internationalen wissenschaftlichen Konferenz zum Thema „Bodengesundheit: Aktueller Stand und zukünftige Anforderungen“ bot 2024 eine Plattform für den Wissensaustausch und die Vernetzung zwischen Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern und Vertretern der Industrie.

Zur weiteren Verbreitung und nachhaltigen Nutzung der Analysepipelines wurden umfangreiche Schulungsmaßnahmen durchgeführt: acht Online-Kurse zu Bioinformatik, Netzwerkanalyse und Schlüsselartidentifikation sowie praxisorientierte Workshops am UFZ für die Partner zu molekularbiologischen Methoden und Bodenanalytik. Diese Maßnahmen haben zur Qualifizierung von Forschenden und Praktikern beigetragen.

Wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Erfolg

RESCHEDULE leistet einen substanziellen Beitrag zur Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Systeme im Mittelmeerraum, was eine dicht besiedelte und vom Klimawandel stark betroffenen Region in Europa darstellt. Die aktive Einbindung lokaler Akteure, insbesondere Kleinbauern und Entscheidungsträger, erhöht die gesellschaftliche Relevanz und stärkt die Umsetzungschancen. Die entwickelten Instrumente (DSS, mikrobielle Indikatoren, Kommunikationsformate) zielen direkt auf verbesserte Bodenbewirtschaftung, Sicherung von Erträgen und Resilienz gegenüber Klimastress im Mittelmeerraum.

Ein wirtschaftlich besonders vielversprechender Projektaspekt ist die Identifikation mikrobieller Schlüsselarten, die zur Entwicklung standortspezifischer Biodünger genutzt werden können.