Abschlussbericht BonaRes - Modul A: SUSALPS | Phase 2

Sustainable use of alpine and pre-alpine grassland soils in a changing climate

Nachhaltige Nutzung alpiner und voralpiner Grünlandböden unter sich änderndem Klima

Berichtszeitraum / Laufzeit: 01.11.2018 – 31.01.2022

Koordination: PD Dr. Ralf Kiese; Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen.

ralf.kiese@kit.edu, Tel.: 08821 183 153

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht Arbeitspaket WP2 Kohlenstoff und Stickstoffspeicher alpiner Grünlandböden (Teilprojekt B, FKZ 031B0516B)

Leitung des Arbeitspakets: Prof. Dr. Dr. h.c. Ingrid Kögel-Knabner,

Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Emil-Ramann-Str. 2, 85354 Freising

koegel@wzw.tum.de, Tel. 08161/71-3677

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Teil I: Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Grünlandökosysteme spielen eine wichtige Rolle für die Futterproduktion der Milch- und Fleischwirtschaft. Neben ihrer wirtschaftlichen Bedeutung umfassen die Ökosystemdienstleistungen des Grünlands auch i) die Speicherung von Boden C und N, die direkt mit dem Klimawandel, der Bodenfruchtbarkeit und der Biodiversität verbunden sind, ii) die Wasserspeicherung und den Erosionsschutz sowie iii) Freizeit und Tourismus. Die Bodenfunktionen im Grünland und die damit verbundenen Ökosystemdienstleistungen sind stark vom globalen Wandel betroffen. Nach wie vor ist jedoch unklar, wie sich diese angesichts der weiter beschleunigten Veränderung von Landnutzung, Management und Klima auswirken werden. Für voralpine/alpine Regionen zeigt sich, dass der Klimawandel doppelt so hoch ist, wie im globalen Durchschnittstrend. In höheren Lagen werden die Biodiversität und die Bodenfunktionen des Grünlands stark durch den Klimawandel beeinflusst. In allen Höhenlagen finden jedoch auch sozioökonomisch bedingte Managementveränderungen statt. Da die Wechselwirkungen von Landnutzung/ Management und Klimawandel eine der größten Unsicherheiten in Zukunftsprognosen darstellen, ist eine inter- und transdisziplinäre Forschung zur Identifizierung angepasster Managementoptionen dringend erforderlich.

SUSALPS begegnet dieser Herausforderung, indem es naturwissenschaftliche und sozioökonomische Disziplinen kombiniert. Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Projektphase und neuen wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen, wurden in Phase II folgende Hauptziele verfolgt:

1. Verbessertes Verständnis über das Zusammenspiel von Klima- und Managementeffekten auf die Entwicklung der organischen Substanz im Boden (C und N) und die Folgen für die Bodenfunktionen im Grünland.

2. Auswirkungen klimawandelbedingter oder gesetzgeberischer Veränderungen (z. B. DüV) auf die Nährstoffnutzungseffizienz / Umweltbelastung sowie auf Menge und Qualität der Erträge.

3. Untersuchung von Klima- und Managementeffekten auf die mikrobielle und pflanzliche Diversität und Erträge.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eine der größten Grünlandregionen in Deutschland ist mit >1 Mio. ha der das alpine/ voralpine Hügelland von Süddeutschland. Diese Grünlandböden, einschließlich noch größerer angrenzender Flächen z.B. in den Europäischen Alpen, werden im Vergleich zu anderen Ökosystemen als besonders vulnerabel gegenüber Auswirkungen des Klimawandels eingestuft. In den letzten Jahrzehnten waren Grünlandökosysteme raschen Landnutzungs- und Managementveränderungen ausgesetzt, die sich derzeit weiter fortsetzen und so zu Verschiebungen in den räumlichen Produktionsmustern führten. Klima-, Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen beeinflussen die Grünlandökosysteme auf unterschiedliche Weise. Vor allem aber verändern sie Bodenbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Nährstoffe), was sich auf die Vegetation und das Bodenmikrobiom auswirkt. All dies beeinflusst die biogeochemischen Stoffkreisläufe von C, N und Wasser mit potenziell nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen. Diese Grünlandböden sind sehr reich an organischem Kohlenstoff, der unter wärmeren Klimabedingungen wahrscheinlich als CO2

freigesetzt werden kann mit negativen Folgen für die Humusbilanz und die Pflanzenproduktion bzw. potentiell erhöhten N Austrägen (z.B. NO3, N2O).

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die wesentlichen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse im Überblick:

- Die Ergebnisse des Pflanzen-Boden-Mesokosmenexperiments zeigten einen signifikanten Rückgang des SOC- und N-Gehalts nach vier Jahren bedingt durch die Temperaturzunahme. Unsere Untersuchungen liefern Belege dafür, dass der Klimawandel zu erheblichen C-Verlusten in SOC-reichen Böden der Alpen führen wird, was nicht nur zum Klimawandel beiträgt, sondern wahrscheinlich auch die Funktionalität dieser Grünlandböden verschlechtert.

- Die Analyse der Bodenaggregierung zeigte eine Abnahme des SOC-Gehalts von Makroaggregaten sowohl bei extensiver als auch bei intensiver Bewirtschaftung, während der SOC-Gehalt in Mikroaggregaten und in der Schluff-/Tonfraktion zunahm.

- Die Analyse von Bodenstruktureigenschaften in (vor-)alpinen Grünlandböden zeigte, dass die SOC- und N-Vorräte mit der Höhe zunahmen. Dies ist vorwiegend ein Ergebnis der Interaktion von organischer Substanz und Ca2+ als Bindemittel für die Bodenaggregierung. Im Gegensatz dazu fördern Regenwürmer in niedrigeren Lagen die Aggregatbildung.

- Die MAOM- und oPOM-Fraktionen sind entscheidend für die physikalisch-chemische Stabilisierung von SOC und können als die wichtigsten diagnostischen Fraktionen im Zusammenhang mit der SOC-Speicherung in (vor-)alpinen Grünlandböden angesehen werden.

- Untersuchungen zu den Auswirkungen der Extensivierung der Grünlandbewirtschaftung auf die SOC- und N-Speicherung zeigten höhere SOC- und TN-Vorräte nach jahrzehntelanger extensiver Bewirtschaftung im Vergleich zu intensiver Bewirtschaftung.

- Im Beweidungsexperiment auf der Brunnenkopfalm zeigten, dass Wiederbeweidung keinen Einfluss auf die mikrobielle Abundanz hat, sie aber eine Verschiebung der Gemeinschaften hin zu einem geringeren Anteil an Pilzen im Vergleich zu Bakterien in intensiv beweideten Flächen induziert.

Neben der projektinternen Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern hat das SUALPS-Konsortium nationale und internationale Partner eingebunden, um der komplexen Fragestellung des Projektes gerecht zu werden. Das Wiederbeweidungsexperiment wird in intensiver Zusammenarbeit mit zahlreichen Landwirten, Behörden und Naturschutzverbänden durchgeführt und ist zu einem regionalen Leuchtturmprojekt praxisnaher Forschung geworden.

Teil II: Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

Mesokosmenexperiment

Die Ergebnisse des Pflanzen-Boden-Mesokosmenexperiments zeigten einen signifikanten Rückgang des SOC- und N-Gehalts nach vier Jahren, aber keine signifikanten Auswirkungen auf die Vorräte aufgrund von uneinheitlichen Veränderungen der Lagerungsdichte.

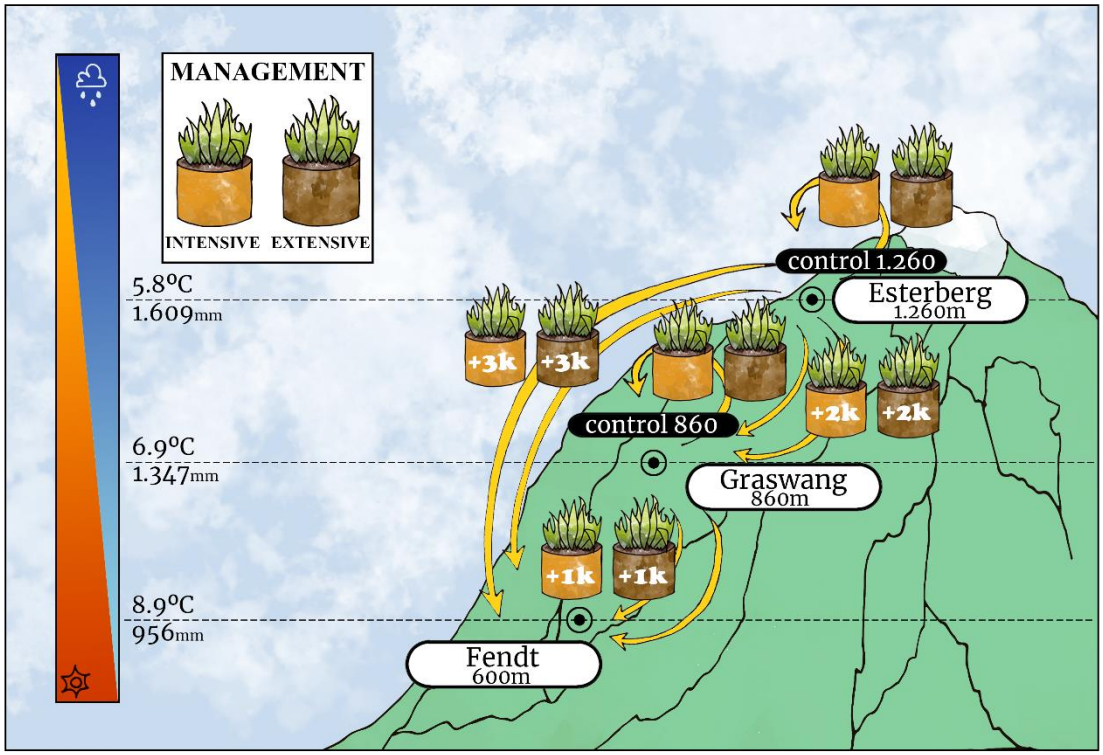

Abb. 1. Schema des Pflanzen-Boden-Mesokosmenexperiments. Die Pfeile zeigen die Versetzung der Mesokosmen von der Esterbergalm (1260 m ü. NN) nach Graswang (860 m ü. NN) mit einer Temperaturzunahme von +1K und von Graswang (860 m ü. NN) nach Fendt (600 m ü. NN) mit einer Temperaturzunahme von +2K sowie von der Esterbergalm (1260 m ü. NN) nach Fendt (600 m ü. NN) mit einer Temperaturzunahme von +3K (Garcia-Franco et al., in Vorbereitung).

Die Analyse der Bodenaggregierung zeigte eine Abnahme des SOC-Gehalts von Makroaggregaten sowohl bei extensiver als auch bei intensiver Bewirtschaftung, während der OC-Gehalt in Mikroaggregaten und in der Schluff-/Tonfraktion zunahm. Unsere Studie lieferte Belege dafür, dass der Klimawandel zu erheblichen C-Verlusten in diesen SOC-reichen Böden führen wird, was nicht nur zum Klimawandel beiträgt, sondern wahrscheinlich auch die Funktionalität dieser Grünlandböden verschlechtert.

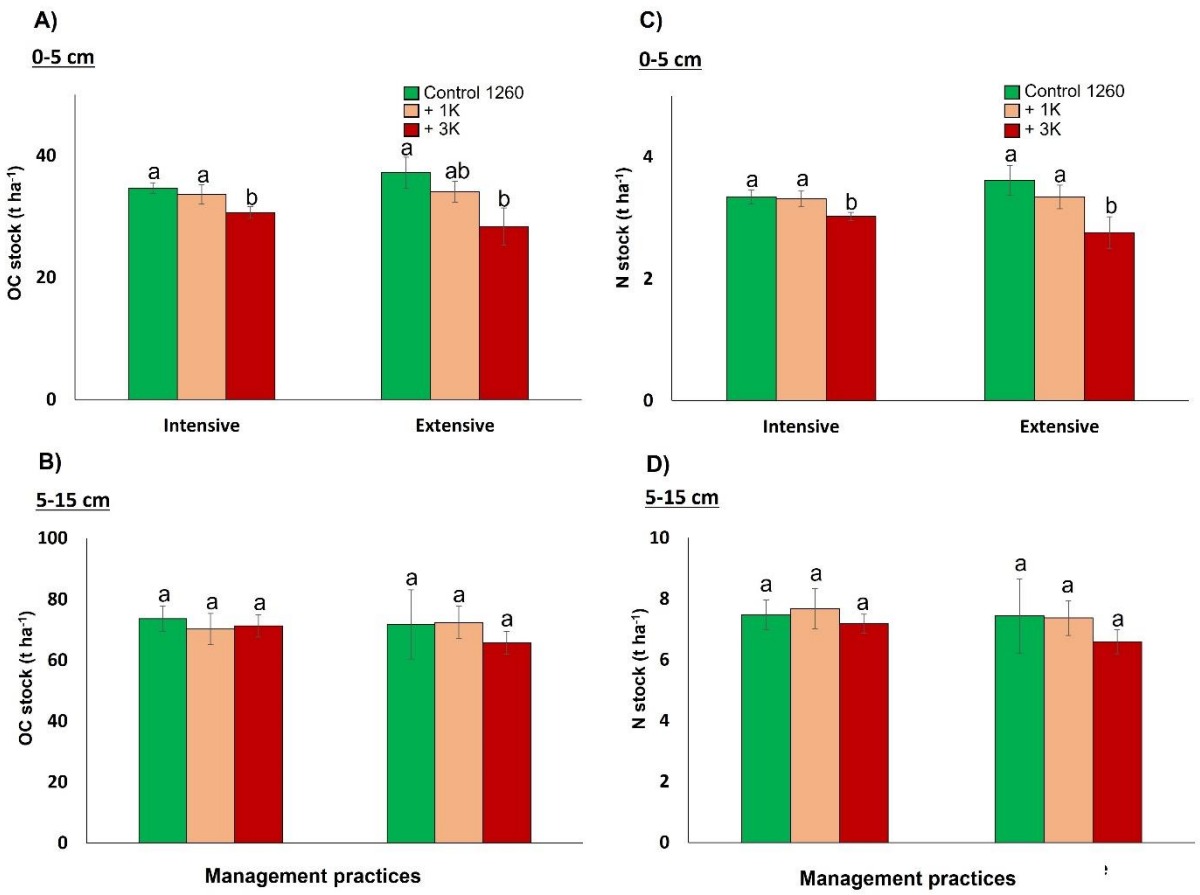

Abb. 2. SOC-Vorräte (t ha^{-1}) in A) 0-5 cm Bodentiefe, B) in 5-15 cm Bodentiefe; und N-Vorräte (t ha^{-1}) in C) 0-5 cm Bodentiefe, D) in 5-15 cm Bodentiefe, jeweils 4 Jahre nach Versetzung der Pflanzen-Boden-Mesokosmen und der Anwendung extensiver vs. intensiver Bewirtschaftungsmethoden.

Analyse der Bodenstruktur im Pflanzen-Boden-Mesokosmenexperiment

Die Analyse von Bodenstruktureigenschaften in (vor-)alpinen Grünlandböden der Esterbergalm (1260 m ü. NN), Graswang (865 m ü. NN) und Fendt (600 m ü. NN) zeigte, dass die SOC- und N-Vorräte mit der Höhe zunahmen und mit relativ hohen Anteilen an wasserstabilen Makroaggregaten aufgrund hoher Gehalte an austauschbarem Ca2+ und Mg2+ verbunden waren (Abb. 3). In höheren Lagen ist die SOC-Stabilisierung durch Aggregatbildung also ein Ergebnis der Interaktion von organischer Substanz und Ca2+ als Bindemittel für die Bodenaggregation. Im Gegensatz dazu fördern Regenwürmer in niedrigeren Lagen (FE) die Aggregatbildung hauptsächlich durch die Absonderung von biogenen Carbonaten (Garcia-Franco et al., 2020).

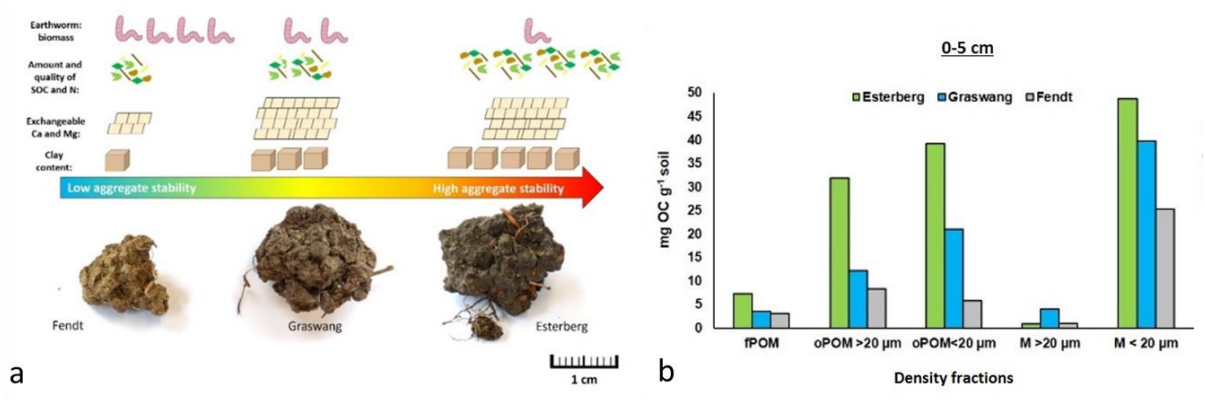

Abb. 3. Übersicht über abiotische und biotische Faktoren, die die SOC-Speicherung in den Bodenaggregaten steuern (a) und die Verteilung der funktionellen Fraktionen der organischen Bodensubstanz (feine partikuläre organische Substanz (fPOM), okkludierte partikuläre organische Substanz (oPOM > 20µm und oPOM < 20µm), mineral-assoziierte organische Substanz (MAOM > 20µm und < 20µm) entlang des Höhengradienten (b).

Identifizierung funktioneller Pools organischer Bodensubstanz (SOM) in (vor-)alpinen Grünlandböden

Hinsichtlich der Identifizierung funktionaler SOM-Pools zeigten die Ergebnisse der Dichtefraktionierung, dass die mineralassoziierte organische Substanz (Schluff- und Tonfraktion < 20 µm, MAOM) und die aggregat-umschlossene partikuläre organische Substanz (oPOM) quantitativ am wichtigsten für die SOC-Speicherung in (vor-)alpinen Grünlandböden sind. Sowohl der MAOM- als auch der oPOM-Anteil nahmen mit der Höhe zu (Fendt < Graswang < Esterberg). Daher sind die MAOM- und oPOM-Fraktionen entscheidend für die physikalisch-chemische Stabilisierung von SOC und können als die wichtigsten diagnostischen Fraktionen im Zusammenhang mit der SOC-Speicherung in (vor-)alpinen Grünlandböden angesehen werden.

Analyse der Auswirkungen der Extensivierung der Grünlandbewirtschaftung auf die SOC/N-Speicherung in Langzeitversuchen

Um die Auswirkungen der Extensivierung der Grünlandbewirtschaftung auf die SOC- und N-Speicherung in Ober- und Unterböden zu untersuchen, wurden Langzeit-LfL-Versuche zur Grünlandextensivierung (bereits seit den 1970er und 1990er Jahren in Kempten) bis in 100 cm Tiefe beprobt. Dabei zeigte sich, dass auch bei stark reduzierter organischer Düngung (Gülle ~5% TM) keine Abnahme von SOC und TN im Vergleich zur intensiven Güllebewirtschaftung zu beobachten war. Behandlungen mit festem Stallmist (~30% TM) ergaben jedoch größere SOC- und N-Vorräte im Vergleich zu Behandlungen, die nur auf Gülledüngung basierten. Weitere Untersuchungen an gepaarten Grünlandstandorten unterschiedlicher Landnutzungsintensität in Phase III (Kooperation mit dem KIT) werden wichtige Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Bewirtschaftungsintensität, Biodiversität (Kooperation UBT-DE) und SOC- und N-Speicherung sowie über die Anwendbarkeit diagnostischer SOM-Fraktionen liefern. Erste Ergebnisse dieses Ansatzes bestätigen höhere SOC- und TN-Vorräte nach jahrzehntelanger extensiver Bewirtschaftung im Vergleich zu intensiver Bewirtschaftung.

Beweidungsexperiment

Im Beweidungsexperiment auf der Brunnenkopfalm wurden kurzfristige Auswirkungen der Wiederbeweidung auf SOC und weitere chemische und biologische Bodeneigenschaften anhand eines Gradienten der Beweidungsintensität untersucht. Einige Monate nach Beginn der Wiederbeweidung stieg der extrahierbare organische Kohlenstoff nur in den sehr intensiv beweideten Flächen an, die nur unwesentlich zur Gesamtfläche beitrugen. Die Wiederbeweidung hatte keinen Einfluss auf die mikrobielle Abundanz, unabhängig von der Beweidungsintensität, induzierte aber eine Verschiebung der Gemeinschaften hin zu einem geringeren Anteil an Pilzen im Vergleich zu Bakterien in intensiv beweideten Flächen. Hinsichtlich der Aggregatgrößenverteilung wurde der Anteil von Makroaggregaten als vielversprechender Indikator für die Qualität der Bodenstruktur identifiziert. Diese Fraktion war die stabilste und zeigte die höchsten SOC-Gehalte (Vidal et al. 2020).

2. Wichtigste Positionen

Im Rahmen des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Materialkosten und Reisekosten angefallen. Personalkosten wurden für die Forschungsarbeiten (Konzeption und Durchführung der Probenahmen, Probenaufbereitung, Laboranalytik, Auswertung der Ergebnisse, Publikation und Vorstellung der Ergebnisse) aufgewendet. Materialkosten sind für Durchführung der Freiland- und Laboruntersuchungen angefallen. Reisekosten fielen für Freilanduntersuchungen, Projektbesprechungen und Tagungen an. Im Verwendungsnachweis wurde über diese Ausgaben im Detail berichtet.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die komplexe Aufgabenstellung des Projektes hinsichtlich eines optimierten Managements von alpennahem und alpinem Grünland im Klimawandel und unter veränderten Bewirtschaftungsaspekten hat die durchgeführten Arbeiten notwendig gemacht. Diese waren in ihrem Umfang zur Erreichung der Projektziele allesamt angemessen und notwendig.

4. Nutzen und Verwertbarkeit

Die in der 2. Phase gewonnen Ergebnisse ermöglichen eine Abschätzung von SOC- und N-Vorratsänderungen und Reaktionen auf den Klimawandel sowie Nutzungsänderungen. Zudem konnten auf Grundlage der gewonnen Ergebnisse zu Fraktionen der organischen Bodensubstanz Indikatoren zu Veränderungen der organischen Bodensubstanz identifiziert werden. Das Detektieren eines durch Klimawandel und/oder Nutzungsänderungen induzierten Verlustes an SOC und N ermöglicht ein frühzeitiges entsprechendes Gegensteuern über die Bewirtschaftung. Diese Frühwarnindikatoren können später im Rahmen eines routinemäßigen Monitorings Anwendung finden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die erzielten Ergebnisse werden in begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert (siehe Veröffentlichungen). Die Ergebnisse werden zudem auf nationalen und internationalen bodenkundlichen Fachtagungen präsentiert. Darüber hinaus werden die wissenschaftlichen Ergebnisse auf Projekttreffen und Workshops des Gesamtverbundes SUSALPS präsentiert,

die auch von angewandt arbeitenden Kolleginnen/ Kollegen besucht werden können. TUM/ WP2 generiert hierbei Daten zu den Parametern C und N in verschiedenen Fraktionen der organischen Bodensubstanz. Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden in die Projektberichte integriert, welche dann einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Zudem werden die Ergebnisse über die projektspezifische Internetseite öffentlich zugänglich gemacht und in die Datenbank des BonaRes-Zentrums eingepflegt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten sowie wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die aus den Feld- und Laborstudien erzielten Ergebnisse werden zur Verbesserung unseres bioökonomischen Prozessverständnisses beitragen und pedogenetische Grundparameter zur Optimierung der Grünlandbewirtschaftung geben. Diese Empfehlungen werden in enger Zusammenarbeit mit Interessengruppen und Partnern erarbeitet und an das regionalspezifische Bewirtschaftungssystem angepasst, so dass sie aber auch auf nationale Ebene übertragen werden können. Mittels partizipativer Ansätze soll durch regelmäßige Workshops ein Netzwerk über die Partner hinaus aufgebaut werden, um das Bewusstsein für die Herausforderungen des globalen Wandels und Einflusses auf das Ökosystem der (pre-) alpinen Grasländer in der Öffentlichkeit zu erhöhen. Da einzelne Fraktionen der organischen Bodensubstanz sehr empfindlich auf Änderungen durch Klima und Nutzung reagieren, können diese als Indikatoren für eine optimale Umsetzung von Nährstoffen genutzt werden. Zudem stellen die gewonnen Ergebnisse wichtige Eingangsdaten für die biogeochemische Modellierung des Verbundprojektes dar. Auf Basis der während der gewonnenen Daten werden standort-angepasste Managementformen entwickelt, um das Potential von alpinen Graslandböden für die C- und N- Speicherung zu nutzen.

5. Aktuelle Entwicklungen und Fortschritte im Fachgebiet

Alpine und voralpine Grünlandböden werden hauptsächlich für die Futterversorgung genutzt und bieten daher einen wichtigen wirtschaftlichen Wert durch die Unterstützung der Milch- und Fleischproduktion (Soussana und Lüscher, 2007, O'Mara 2012). Die Bedeutung von Grünland für andere regulierende, unterstützende und kulturelle Ökosystemleistungen (ESS) wird jedoch zunehmend anerkannt (Le Clec'h et al., 2019). Zu den Ökosystemleistungen von Grünland gehören die Speicherung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden und die Fruchtbarkeit, wobei beide Leistungen in direktem Zusammenhang mit dem Klimawandel, der biologischen Vielfalt, der Wasserrückhaltung und -filterung, dem Erosionsschutz sowie der Bereitstellung von Raum für Erholung und Tourismus stehen (Schirpke et al., 2017; Bengtsson et al., 2019). Im Vergleich zu anderen Ökosystemen sind die Bodenfunktionen von Grünland und die damit verbundenen ESS am anfälligsten für den Klimawandel, aber auch für eine Intensivierung der Bewirtschaftung (Schröter et al., 2005; Lamarque et al., 2014; Kohler et al., 2017; Sippel et al., 2018; Berauer et al. 2019; Wang et al., 2019; Felipe-Lucia et a., 2020; Schils et al., 2022). Die Auswirkungen des Klima- und Bewirtschaftungswandels auf Grünlandökosysteme variieren jedoch stark in Abhängigkeit von einzelnen Klimawandeltreibern (hier: Temperatur und Niederschlag) und in Abhängigkeit von Geologie, Topographie und Landschaftsstruktur (Feng et al., 2017; Le Clec'h et al., 2019, Seeber et al. 2022). Daher ist immer noch wenig darüber bekannt, welche Grünlandbewirtschaftungsstrategie das Angebot an mehreren ESS maximiert (Neyret et al., 2020). Das Wissen über Synergien und Zielkonflikte zwischen den ESS von Grünland, z. B. Produktivität vs. Biodiversität und Boden-C-Vorräte (Beckmann et al., 2019; Felipe-Lucia et

al., 2020), ist für die Anpassung und Optimierung der Grünlandbewirtschaftung von großer Bedeutung. Die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsstrategien auf die Bereitstellung von ESS sind räumlich und zeitlich sehr unterschiedlich und müssen daher eher auf der Ebene des Betriebs/der Landschaft als auf der Ebene der Parzelle untersucht werden (Simons und Weisser, 2017; Grass et al., 2019; Le Clec'h et al., 2019). Bisher wurden Aspekte der Auswirkungen des Klimawandels auf die ESS-Bereitstellung von Grünland in Bewertungen kaum berücksichtigt, obwohl sich die Optimierungspläne für die Landbewirtschaftung unter heutigen und unter den Bedingungen des Klimawandels wahrscheinlich unterscheiden. Da die Produktivität von Grünland in den Voralpenregionen unter den Bedingungen des Klimawandels bei ausreichenden Niederschlagsmengen nachweislich zunimmt (Berauer et al. 2019; Wang et al., 2019), bietet diese allgemeine Produktivitätssteigerung das Potenzial, die Bewirtschaftungsintensität für einige Grünlandflächen möglicherweise zu verringern, z. B. zur Förderung der Biodiversität, der Dürreresistenz und damit der Störungsregulierung, ohne die Futtermittelproduktion zu gefährden. Allerdings wird der Klimawandel wahrscheinlich auch negative Auswirkungen auf die Stabilität von voralpinem und alpinem Grünland haben, insbesondere im Hinblick auf die Bodenkohlenstoff- und Bodenstickstoff-Speicherung und die Biodiversität (Puissant et al., 2017; Berauer et al. 2019; Schlingmann et al. 2020, Zistl-Schlingmann et al., 2020, Wang et al., 2019, 2021). Dies erfordert u.a. eine verbesserte Bewirtschaftung z.B. mit erhöhter Dünger-N-Nutzungseffizienz mit reduzierten NH3- und Treibhausgas-Emissionen (Emmerling et al., 2020). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Entscheidungsfindung der Landwirte in hohem Maße von den EU-Agrarumweltprogrammen beeinflusst wird, die z. B. Anreize für die extensive Grünlandnutzung bieten. Auch die jüngsten Anpassungen der Höchstdüngungsraten und Ausbringungstechniken durch die EU und die deutsche Gesetzgebung beeinflussen die Entscheidungen der Landwirte bei der Grünlandbewirtschaftung (Hodge et al. 2015, Schroeder et al., 2015). Um Leitlinien für die Anpassung an den Klimawandel bereitzustellen, müssen alle ökologischen und sozioökonomischen Faktoren, die die Entscheidungen der Landwirte beeinflussen, in einen Rahmen integriert werden, der auf die räumliche Bewertung von Synergien und Konflikten bei der Bereitstellung mehrerer ESS abzielt (van Zanten et al., 2014; Le Clec'h et al., 2019). Angesichts der Kompromisse zwischen den ESS ist es unwahrscheinlich, dass alle Dienstleistungen auf einem hohen Niveau erhalten werden können (van der Plas et al., 2019), was sich letztlich auf die Entscheidungsfindung und den Konsens zwischen verschiedenen Interessengruppen auswirkt (Gerling et al., 2019). Der Prozess der Bewertung und Kommunikation von Risiken und Vorteilen kann durch die Bereitstellung der dringend benötigten Produkte (Karten) und Instrumente (Modelle) zur Entscheidungsunterstützung erleichtert werden, die jedoch sowohl die Parzellen- als auch die Betriebs- und Landschaftsebene abdecken sollten (Neyret et al., 2020).

SUSALPS geht diese Herausforderungen für voralpine und alpine Grünlandsysteme an, indem es naturwissenschaftliche und sozioökonomische Disziplinen kombiniert und dabei gemeinsame Feld-, Fernerkundungs- und Modellierungsstudien durchführt, die Parzellen-, Betriebs- und Regionalebene umfassen und in enger Zusammenarbeit mit den Interessengruppen konzipiert und durchgeführt werden. Phase III konzentriert sich daher auf die Synthese experimenteller Arbeiten über die Wechselwirkungen zwischen Pflanzengemeinschaften und Bodenmikroben und dem C-, N- und P-Kreislauf im Boden unter verschiedenen Bewirtschaftungs- und Klimabedingungen. Unsere Analyse wird die jüngsten Arbeiten zu Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben (z. B. Boeddinghaus et al., 2019; Dubey et al., 2019), Pflanzenarten und C-Speicherung (z. B. Hungate et al., 2017; Prommer et al, 2020), die C/N/P-Stöchiometrie von Pflanzen und Mikroben im Boden sowie Nährstoffkreisläufe und -verluste (z. B. Gong et al., 2019) und die Eignung von Pflanzen- und Mikrobenarten und -eigenschaften als Indikatoren für ESS und

Ökosystemleistung (Nannipieri et al., 2020). Die Ergebnisse werden durch den Einsatz von Modellierungssystemen und Fernerkundungsansätzen (z. B. auf der Grundlage von Ma et al., 2020, Schwieder et al., 2020) getestet und auf die landwirtschaftliche und regionale Ebene übertragen. SUSALPS wird Produkte und Instrumente weiterentwickeln, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen und es Wissenschaftlern und Praktikern gleichermaßen zu ermöglichen, die Rolle der Anforderungen der Interessengruppen und die biophysikalischen Kompromisse zu verstehen.

6. Veröffentlichungen

Berauer BJ, Wilfahrt PA, Reu B, Schuchardt MA, Garcia-Franco N, Zistl-Schlingmann M, Dannenmann M, Kiese R, Kühnel A, Jentsch A (2020) Predicting forage quality of species-rich pasture grasslands using vis-NIRS to reveal effects of management intensity and climate change. Agriculture, Ecosystems and Environment 296, 106929. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106929.

Garcia-Franco N, Walter R, Wiesmeier M, Colocho Hurtarte LC, Berauer BJ, Buness V, Zistl-Schlingmann M, Kiese R, Dannenmann M, Kögel-Knabner I (2020) Biotic and abiotic controls on carbon storage in aggregates in calcareous alpine and pre-alpine grassland soils. Biology and Fertility of Soils, DOI: 10.1007/s00374-020-01518-0.

Schlingmann M, Tobler U, Berauer B, Garcia-Franco N, Wilfahrt P, Wiesmeier M, Jentsch A, Wolf B, Kiese R, Dannenmann M (2020) Intensive slurry management and climate change promote nitrogen mining from organic matter-rich montane grassland soils. Plant and Soil 456: 81-98, DOI: 10.1007/s11104-020-04697-9.

Schucknecht A, Krämer A, Asam A, Mejia Aguilar A, Garcia-Franco N, Schuchard MA, Jentsch A, Kiese R (2020) Vegetation traits of pre-Alpine grasslands in southern Germany. Scientific Data 7: 316. doi: 10.1038/s41597-020-00651-7

Vidal A, Schucknecht A, Töchterle P, Andrade Linares DR, Garcia-Franco N, von Heßberg A, Krämer A, Sierts A, Fischer A, Willibald G, Fütterer S, Ewald J, Baumert V, Weiß M, Schulz S, Schloter M, Bogacki W, Wiesmeier M, Müller CW, Dannenmann M (2020) High resistance of soils to short-term re-grazing in a long-term abandoned alpine pasture. Agriculture, Ecosystems & Environment 300, 107008, DOI: 10.1016/j.agee.2020.107008.

von Heßberg A, Jentsch A, Berauer B, Ewald J, Fütterer S, Görgen A, Kluth S, Krämer A, Koellner T, Scharmann M, Schloter M, Schmitt T, Schödl M, Schuchardt M, Schucknecht A, Steinberger S, Vidal A, Voith J, Wiesmeier M (2021) Almen in Zeiten des Klimawandels – Schutz der Artenvielfalt durch (Wieder-) Beweidung? Die Fallstudie Brunnenkopfalm im Ammergebirge. Naturschutz und Landschaftsplanung 53(3), 28-36. doi: 10.1399/NuL.2021.03.02

7. Literatur

Beckmann, M., Gerstner, K., Akin-Fajiye, M., Ceaușu, S., Kambach, S., Kinlock, N.L., Phillips, H.R.P., Verhagen, W., Gurevitch, J., Klotz, S., Newbold, T., Verburg, P.H., Winter, M., Seppelt, R., 2019. Conventional land-use intensification reduces species richness and

increases production: A global meta-analysis. Global Change Biology 25, 1941–1956. https://doi.org/10.1111/gcb.14606.

Bengtsson, J., Bullock, J.M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., Connor, T.O., O´Farrell, P.J., Smith, H.G., Lindborg, R., 2019. Grasslands — more important for ecosystem services than you might think. Ecosphere 10. https://doi.org/10.1002/ecs2.2582

Berauer, B.J., Wilfahrt, P.A., Arfin-Khan, M.A.S., Eibes, P., von Heßberg, A., Ingrisch, J., Schloter, M., Schuchardt, M.A., Jentsch, A., 2019. Low resistance of montane and alpine grasslands to abrupt changes in temperature and precipitation regimes Arctic, Antarctic and Alpine Research 51, 215-231. DOI: 10.1080/15230430.2019.1618116

Boeddinghaus, R.S., Marhan, S., Berner, D., Boch, S., Fischer, M., Hölzel, N., Kattge, J., Klaus, V.H., Kleinebecker, T., Oelmann, Y., Prati, D., Schäfer, D., Schöning, I., Schrumpf, M., Sorkau, E.,

Kandeler, E., Manning, P., 2019. Plant functional trait shifts explain concurrent changes in the structure and function of grassland soil microbial communities. Journal of Ecology 107, 2197–2210. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13182

Dubey, A., Malla, M.A., Khan, F., Chowdhary, K., Yadav, S., Kumar, A., Sharma, S., Khare, P.K., Khan, M.L., 2019. Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. Biodiversity and Conservation 28, 2405–2429. https://doi.org/10.1007/s10531-019-01760-5

Emmerling C., et al., 2020. Meta-analysis of Strategies to reduce NH3 emissions from slurries in European Agriculture and Consequences for Greenhouse Gas Emissions. Agronomy 10, 1633

Felipe-Lucia, M.R., Soliveres, S., Penone, C., Fischer, M., Ammer, C., Boch, S., Boeddinghaus, R.S., Bonkowski, M., Buscot, F., Fiore-Donno, A.M., 2020. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 28140–28149

Feng, W., Liang, J., Hale, L.E., Jung, C.G., Chen, J., Zhou, J., Xu, M., Yuan, M., Wu, L., Bracho, R., Pegoraro, E., Schuur, E.A.G., Luo, Y., 2017. Enhanced decomposition of stable soil organic carbon and microbial catabolic potentials by long-term field warming. Global Change Biology 23, 4765–4776. https://doi.org/10.1111/gcb.13755

Gerling, C., Wätzold, F., Theesfeld, I., Drechsler, M., Nixdorf, B., Isselstein, J., Pirscher, F., Rücker, J., Sturm, A., 2019. Modeling the co-evolution of natural, economic and governance subsystems in integrated agri-ecological systems: Perspectives and challenges. Ecological Complexity 40, 100792. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2019.100792

Gong, S., Zhang, T., Guo, J., 2019. Warming and Nitrogen Addition Change the Soil and Soil Microbial Biomass C:N:P Stoichiometry of a Meadow Steppe. International Journal of Environmental Research and Public Health 16, 2705. https://doi.org/10.3390/ijerph16152705

Grass, I., Loos, J., Baensch, S., et al., 2019. Land -sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. People and Nature 1: 262–272. https://doi.org/10.1002/pan3.21

Hodge, I., Hauck, J., Bonn, A., 2015. The alignment of agricultural and nature conservation policies in the European Union. Conservation Biology 29, 996–1005

Hungate, B.A., Barbier, E.B., Ando, A.W., Marks, S.P., Reich, P.B., van Gestel, N., Tilman, D., Knops, J.M.H., Hooper, D.U., Butterfield, B.J., Cardinale, B.J., 2017. The economic value

of grassland species for carbon storage. Science Advances 3. https://doi.org/10.1126/sciadv.1601880

Kohler, M., Stotten, R., Steinbacher, M., Leitinger, G., Tasser, E., Schirpke, U., Tappeiner, U., Schermer, M., 2017. Participative Spatial Scenario Analysis for Alpine Ecosystems. Environmental Management 60, 679–692. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0903-7

Lamarque, P., Lavorel, S., Mouchet, M., Quetier, F., 2014. Plant trait-based models identify direct and indirect effects of climate change on bundles of grassland ecosystem services. Proc. Natl. Acad. Sci. 111, 13751–13756. https://doi.org/10.1073/pnas.1216051111

Le Clec'h, S., Finger, R., Buchmann, N., Gosal, A.S., Hörtnagl, L., Huguenin-Elie, O., Jeanneret, P., Lüscher, A., Schneider, M.K., Huber, R., 2019. Assessment of spatial variability of multiple ecosystem services in grasslands of different intensities. J. Environ. Manage. 251, 109372. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109372

Ma, X., Migliavacca, M., Wirth, C., Bohn, F.J., Huth, A., Richter, R., Mahecha, M.D., 2020. Monitoring Plant Functional Diversity Using the Reflectance and Echo from Space. Remote Sensing 12, 1248. https://doi.org/10.3390/rs12081248

Nannipieri, P., Ascher-Jenull, J., Ceccerini, M.T., Pietramellara, G., Renella, G., Schloter, M., 2020. Beyond microbial diversity for predicting soil functions: A mini review. Pedosphere 30, 5-17

Neyret, M., Fischer, M., Allan, E., Hölzel, N., Klaus, V.H., Kleinebecker, T., Krauss, J., Le Provost, G., Peter, S., Schenk, N., Simons, N.K., van der Plas, F., Binkenstein, J., Börshig, C., Jung, K., Prati, D., Schäfer, M., Schäfer, D., Schöning, I., Schrumpf, M., Tschapka, M., Westphal, C., Manning, P., 2020. Landscape management for grassland multifunctionality. bioRxiv 2020.07.17.208199. https://doi.org/10.1101/2020.07.17.208199

O'Mara, F.P., 2012. The role of grasslands in food security and climate change. Ann. Bot. 110, 1263–1270. https://doi.org/10.1093/aob/mcs209

Prommer, J., Walker, T.W.N., Wanek, W., Braun, J., Zezula, D., Hu, Y., Hofhansl, F., Richter, A., 2020. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. Global Change Biology 26, 669–681. https://doi.org/10.1111/gcb.14777

Puissant, J., Mills, R.T.E., Robroek, B.J.M., Gavazov, K., Perrette, Y., De Danieli, S., Spiegelberger, T., Buttler, A., Brun, J.-J., Cécillon, L., 2017. Climate change effects on the stability and chemistry of soil organic carbon pools in a subalpine grassland. Biogeochemistry 132, 123–139. https://doi.org/10.1007/s10533-016-0291-8

Seeber, J., et al, 2022. Effects of land use and climate on carbon and nitrogen pool partitioning in European mountain grasslands. Science of the Total Environment 822, 153380

Schils, R.L.M., et al, 2022. Permanent grasslands in Europe: Land use change and intensification decrease their multifunctionality. Agriculture, Ecosystems and Environment 330 107891.

Schirpke, U., Kohler, M., Leitinger, G., Fontana, V., Tasser, E., Tappeiner, U., 2017. Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. Ecosystem Services 26, 79–94

Schlingmann M, Tobler U, Berauer B, Garcia-Franco N, Wilfahrt P, Wiesmeier M, Jentsch A, Wolf B, Kiese R, Dannenmann M. 2020. Intensive slurry management and climate change

promote nitrogen mining from organic matter-rich montane grassland soils. Plant and Soil 456: 81-98. DOI: 10.1007/s11104-020-04697-9

Schroeder, L.A., Chaplin, S., Isselstein, J., 2015. What influences farmers' acceptance of agri-environment schemes? An ex-post application of the 'Theory of Planned Behaviour'. Landbauforschung 65, 1528

Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I.C., Araújo, M.B., Arnell, N.W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T.R., Gracia, C.A., de la Vega-Leinert, A.C., Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J.I., Kankaanpää, S., Richard J. T. Klein, Lavorel, S., Lindner, M., Metzger, M.J., Meyer, J., Mitchell, T.D., Reginster, I., Rounsevell, M., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Zaehle, S., Zierl, B., 2005. Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. Science 310, 1333–1337

Schwieder, M., Buddeberg, M., Kowalski, K., Pfoch, K., Bartsch, J., Bach, H., Pickert, J., Hostert, P., 2020. Estimating Grassland Parameters from Sentinel-2: A Model Comparison Study. PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci. 88, 379–390. https://doi.org/10.1007/s41064-020-00120-1

Simons, N.K., Weisser, W.W., 2017. Agricultural intensification without biodiversity loss is possible in grassland landscapes. Nature Ecology and Evoluton 1, 1136–1145. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0227-2

Sippel, S., Reichstein, M., Ma, X., Mahecha, M.D., Lange, H., Flach, M., Frank, D., 2018. Drought, Heat, and the Carbon Cycle: a Review. Current Climate Change Reports 4, 266–286. https://doi.org/10.1007/s40641-018-0103-4

Soussana, J.F., Lüscher, A., 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. Grass Forage Science 62, 127-134.

Van der Plas, F., Allan, E., Fischer, M., Alt, F., Arndt, H., Binkenstein, J., Blaser, S., Blüthgen, N., Böhm, S., Hölzel, N., 2019. Towards the development of general rules describing landscape heterogeneity–multifunctionality relationships. Journal of Applied Ecology 56, 168–179

Van Zanten, B.T., Verburg, P.H., Espinosa, M., Gomez-y-Paloma, S., Galimberti, G., Kantelhardt, J., Kapfer, M., Lefebvre, M., Manrique, R., Piorr, A., Raggi, M., Schaller, L., Targetti, S., Zasada, I., Viaggi, D., 2014. European agricultural landscapes, common agricultural policy and ecosystem services: a review. Agronomy for Sustainable Development 34, 309–325. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0183-4

Wang N, Xia L., Goodale C.L., Butterbach-Bahl K., Kiese R. (2021). Climate change can accelerate depletion of montane grassland C stocks. Global Biogeochemical Cycles, https://doi.org/10.1029/2020GB006792.

Wang, N., Quesada, B., Xia, L., Butterbach-Bahl, K., Goodale, C., Kiese, R., 2019. Effects of climate warming on carbon fluxes in grasslands - a global meta-analysis. Global Change Biology 25, 1839-1851. DOI: 10.1111/gcb.14603 Zistl-Schlingmann M., Kengdo S.K., Kiese R., Dannenmann M. (2020). Management Intensity Controls Nitrogen-Use-Efficiency and Flows in Grasslands-A N-15 Tracing Experiment. Agronomy, 10, DOI:10.3390/agronomy10040606.