

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bericht zum Verbundprojekt:
Aufwertung mediterraner landwirtschaftlicher Kleinbetriebe durch
den Anbau bislang ungenutzter Wildpflanzen (VALUEFARM)

Förderkennzeichen: 01DH20006

Zuwendungsempfänger:
Bergische Universität Wuppertal

Ausführende Stelle:
Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen,
Boden- und Grundwassermanagement
Professor Dr. Ing. agr. Jörg Rinklebe

Berichtszeitraum: 01.05.2021 – 30.04.2024

Autoren: Dr. Sabry M. Shaheen, M.Sc. Felizitas Boie, Prof. Dr. Jörg Rinklebe

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 01DH20006 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzbericht zum Verbundprojekt “VALUEFARM” (Förderkennzeichen: 01DH20006)

Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand

Essbare Wildpflanzen (WEP) sind wenig genutzte pflanzliche Ressourcen. Sie werden häufig verzehrt, insbesondere bei Nahrungsmittelknappheit, und gelten daher als potenzielle Lösung für die Überwindung der Nahrungsmittelknappheit. Daher sind innovative Studien und dringende Maßnahmen erforderlich, um die WEP-Ressourcen in den mediterranen und europäischen Ländern wirksam zu bewirtschaften, bevor sie vom Aussterben bedroht werden.

Der Anbau von WEPs in mediterranen und südeuropäischen Ländern ist weiterverbreitet als in mittel- und nordeuropäischen Ländern, einschließlich Deutschland. Die Eignung des Anbaus ausgewählter WEPs auf verschiedenen deutschen Böden ist bisher nicht untersucht worden. Ziel des Projektes war es daher, ausgewählte WEP-Arten auf verschiedenen deutschen Böden zu kultivieren sowie die agronomische Leistung von WEP durch Gewächshaus- und Landwirtschaftsversuche zu beschreiben und zu bewerten, um die besten Praxisleitfäden für die Anforderungen der Pflanzen in Bezug auf Veränderungen der Bodentypen und ihrer Eigenschaften sowie des Gehalts Nährstoffen und an toxischen Elementen (TEs) zu erstellen.

Ablauf des Vorhabens

Um unsere Ziele und Aufgaben (Aufgaben 3.2, 3.3 und 3.4) im dritten Arbeitspaket des VALUEFARM-Projekts zu erreichen, haben wir ein Feld- und zwei Gewächshausversuche durchgeführt. Im ersten Gewächshausexperiment (Aufgabe 3.2) haben wir das Potenzial des Anbaus verschiedener WEPs wie *Crithmum maritimum*, *Portulaca oleraceae* und *Sonchus oleraceus* in verschiedenen deutschen Böden in Abhängigkeit von Bodentypen und -eigenschaften untersucht. Wir sammelten sechs deutsche Böden aus verschiedenen Regionen (zwei Ackerböden aus Düsseldorf und Rostock, Waldboden aus Viersen, Gartenbodenmaterial und Grünland-Auenboden aus Frankfurt sowie einen künstlichen Boden) und kultivierten diese Böden mit *Crithmum maritimum*, *Portulaca oleraceae* und *Sonchus oleraceus* unter Gewächshausbedingungen. Außerdem führten wir auf einem Bauernhof in der Nähe von Düsseldorf einen Feldversuch mit Samen von griechischen *Portulaca oleraceae* und den in Deutschland heimischen wilden *Portulaca oleraceae* durch. Sowohl in den Topf- als auch in den Feldversuchen beprobten wir Boden und Pflanzen. Die Bodenproben wurden charakterisiert, extrahiert und auf ihren Gehalt an verfügbaren Nährstoffen und Makroelementen (C, N, P, K, Ca, Mg und S) sowie an Spuren- und toxischen Elementen (Al, Fe, Mn, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V und Zn) analysiert. Das Frisch- und Trockengewicht der geernteten Pflanzen (Wurzeln, Stängel und Blätter) wurde erfasst. Die Pflanzenproben wurden extrahiert und auf die gleichen Elemente analysiert.

Um die Aufgabe 3.3 zu erfüllen, führten wir den zweiten Topfversuch im Gewächshaus durch, um den Einfluss des Grades der Bodenkontamination durch toxische Elemente auf das Wachstum der WEPs zu untersuchen. Wir beprobten zwei kontaminierte Auenböden, um zwei Stufen (d.h. hoch und mittel) der Bodenkontamination mit TEs (z.B. As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb und Zn) zu repräsentieren. Der hoch belastete Boden wurde aus dem Pescher Busch, NRW, Deutschland, entnommen und mit (PB-Boden) abgekürzt, der mäßig belastete Boden wurde aus der Hasenmühle, NRW, Deutschland, entnommen und mit (HM-Boden) abgekürzt. Die beiden Böden wurden mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus*, *Scolymus hispanicus* und *Plantago weldenii* bepflanzt. Am Ende des Versuchs beprobten wir Boden und Pflanzen. In den Boden- und Pflanzenproben extrahierten und analysierten wir die Elemente P, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Al, Ag, As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl und V.

Um Aufgabe 3.4 zu erfüllen, wurden die frischen Bodenproben der Rhizosphäre aus dem ersten Topfversuch (Aufgabe 3.2) entnommen und für mikrobielle Analysen aufbewahrt. Die mikrobielle Analyse (Analyse der Phospholipidfettsäuren (PLFA)) wurde am Rhizosphärenboden durchgeführt.

Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Ergebnisse des ersten Gewächshausversuchs zeigten, dass sich die Biomasse der Pflanzen je nach Bodentyp und -eigenschaften unterschiedlich war. So war beispielsweise das Trockengewicht der *Sonchus*- und *Crithimum*-Pflanzen, die in Garten- und Grünlandböden angebaut wurden, signifikant höher als das der Pflanzen, die in den anderen Böden angebaut wurden, während das Trockengewicht von Portulak, der in den beiden Ackerböden angebaut wurde, signifikant höher war als das der Pflanzen, die in den anderen Böden angebaut wurden. Die höhere Biomasse der Pflanzen in den Garten-, Acker- und Grünlandböden im Vergleich zu den Wald- und Kunstböden lässt sich durch ihren höheren Gehalt an Makro- und Mikronährstoffen im Vergleich zu den anderen Böden erklären und umgekehrt.

Die Ergebnisse des Feldversuchs zeigten, dass der griechische Portulak ein signifikant höheres Gewicht an frischer und trockener Biomasse produzierte als die einheimischen deutschen Portulakpflanzen. Die Verfügbarkeit von Nährstoffen und Spurenelementen in der Rhizosphäre von griechischem und deutschem Portulak unterschied sich erheblich. Zum Beispiel war die Verfügbarkeit von P, K und Ca in der Rhizosphäre des deutschen Portulak höher als die des griechischen Portulak und umgekehrt für die anderen Elemente.

Die Ergebnisse des zweiten Gewächshausversuchs zeigten, dass *Portulaca* und *Sonchus* in Böden wachsen können, die bis zu 3200,0, 1075,0, 600,0, 450,0, 80,0 bzw. 6,6 mg/kg Cu, Zn, Cr, Pb, Ni und Cd enthalten. Daher könnten diese Pflanzen zur Phytostabilisierung von mit TEs kontaminierten Böden verwendet werden.

Die PLFA-Ergebnisse spiegeln die komplexen Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroorganismen wider, die wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Bodentexturen, Nährstoffgehalte und pH-Werte in den sechs Böden beeinflusst werden. Darüber hinaus wirkten sich auch die Pflanzenarten auf die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden aus, da sich die PLFA-Profile in der Rhizosphäre von *Portulak*, *Sonchus* oder *Crithimum* im selben Boden unterschieden. Die PLFA-Analyse ergab: 1) *Crithimum* ist stark mit Pilzen assoziiert, 2) das Wachstumsstadium (*Crithimum* lag in der Reife hinter *Sonchus* und *Portulak*) steuert möglicherweise die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft und 3) Böden enthalten ihre autochthone mikrobielle Gemeinschaft, aber Pflanzen sind wahrscheinlich in der Lage, sie durch Wurzelexsudate und Konkurrenz um Nährstoffe zu beeinflussen; eine vielfältige mikrobielle Gemeinschaft ist für die Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit unerlässlich.

Es wurde mit den Projektpartnern zusammengearbeitet.

Fazit und mögliche Anwendungen

WEP wie *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* und *Crithimum maritimum* könnten auf den deutschen Acker-, Garten-, Wald- und Grünlandböden angebaut werden. *Sonchus*- und *Crithimum*-Pflanzen gedeihen besser auf Garten- und Grünlandböden als auf Acker- und Waldböden. *Portulak* wächst auf den Ackerböden besser als auf den anderen Böden. *Portulaca*, *Sonchus*, *Plantago* und *Scolymus* können unter TE-Belastung wachsen, insbesondere unter der hohen Belastung mit Cu, Cd, Cr, Pb und Zn. Dies könnte bedeuten, dass diese Pflanzen für die Phytosanierung von mit TEs kontaminierten Böden verwendet werden können. Diese Ergebnisse könnten Entscheidungsträgern in den betreffenden Untersuchungsgebieten helfen, neue landwirtschaftliche Praktiken für den Anbau von WEPs in den deutschen Böden zu entwickeln.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes wurden 187.889,68 € Personalmittel sowie 63.038,73 € für sonstige sächliche Verwaltungsausgaben und 721,31 € für Dienstreisen verausgabt.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Projektarbeiten waren notwendig und angemessen.

Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Essbaren Wildpflanzen (WEP) sind reich an essenziellen Nährstoffen wie Vitaminen, Mineralien und Antioxidantien, die für eine optimale Gesundheit unerlässlich sind. Die essbaren Wildpflanzen liefern Früchte, nährstoffreiche Blätter und andere nützliche Pflanzenteile wie Zwiebeln, Wurzeln, Samen und Blattstiele für die Bevölkerung, insbesondere in Zeiten der Nahrungsmittelknappheit. WEPs können als Nahrungsmittel, Medikamente, Fasern und auch als Futter für Haustiere und andere Zwecke verwendet werden. WEPs spielen eine entscheidende Rolle bei der Sicherung der Ernährung und des Lebensunterhalts für viele Menschen auf der ganzen Welt, insbesondere in den Entwicklungsländern.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass:

- 1) mehrere mediterrane essbare Wildpflanzen (WEPs) wie *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus*, *Crithmum maritimum*, *Scolymus hispanicus* und *Plantago weldenii* auf verschiedenen deutschen Böden (Acker-, Garten-, Wald- und Grünlandböden) angebaut werden können. Portulak wächst auf Ackerböden besser als auf den anderen Böden. *Sonchus* und *Crithmum* gedeihen besser in Garten- und Grünlandböden als in Acker- und Waldböden,
- 2) *Portulaca*, *Sonchus*, *Plantago* und *Scolymus* wachsen unter dem Stress der Kontamination mit toxischen Elementen (TEs), insbesondere auch bei einer hohen Kontamination mit Cu, Cd, Cr, Pb und Zn.

Kurzfristig (1 Jahr nach Projektabschluss):

Veröffentlichung der erzielten Ergebnisse in den Fachzeitschriften. Die im Gewächshaus gewonnenen experimentellen Daten sollten unter Feldbedingungen verifiziert werden. Anschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse auf der Basis der verifizierten Ergebnisse an Landwirte und Entscheidungsträger weitergegeben, um die Akzeptanz des Anbaus von WEPs in deutschen Böden und deren ernährungsphysiologische Bedeutung zu fördern.

Mittelfristig (1-3 Jahre nach Projektabschluss):

- 1) Die untersuchten WEPs werden in Gärten von Wohngebieten angebaut und als Nahrungs- und Futtermittel genutzt.
- 2) Das Saatgut dieser WEPs wird unter deutschen Bedingungen für den großflächigen Anbau produziert.
- 3) Die untersuchten WEPs werden großflächig in Deutschland angebaut.
- 4) Die Forschungsergebnisse werden in nationale und internationale Initiativen sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie Publikationen für Anwender und die interessierte Öffentlichkeit (z.B. Leitfäden) einfließen.
- 5) Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in weitere Forschungsprojekte und praktische Arbeiten ein.

Langfristig (1-5 Jahre nach Projektabschluss):

- 1) WEPs werden auf großen Flächen von Ackerböden angebaut, insbesondere mit *Portulaca oleracea*.
- 2) Die auf unbelasteten Böden angebauten WEPs dienen als Nahrungsmittel für Menschen und als Futtermittel für Tiere.
- 3) Die untersuchten WEPs, insbesondere *Portulaca oleracea*, werden auf mit TEs kontaminierten Böden angebaut, um sie für das Phytomanagement dieser Böden zu nutzen.
- 4) Bestimmte verschmutzte Wald- und Grünlandböden werden durch die WEPs saniert.
- 5) Die kultivierten WEPs in mit TEs kontaminierten Böden werden für die Produktion von Biokraftstoffen oder Fasern verwendet.
- 6) Die internationale Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern wird gestärkt und die Präsenz der deutschen Bodenforschung auf internationaler Ebene wird intensiviert.

7) Die gewonnenen Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen führen dazu, die deutsche Landwirtschaft durch den nachhaltigen Anbau dieser neuen WEPs zu stärken und ihre Produktivität und Bedeutung zu sichern.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Auftragnehmer

Kurzfristig (1 Jahr nach Projektabschluss):

Essbare Wildpflanzen werden in mediterranen Ländern in Praxisversuchen angebaut.

Mittelfristig (1-3 Jahre nach Projektabschluss):

Der Anbau von essbaren Wildpflanzen wird in mediterranen Ländern in die landwirtschaftliche Praxis überführt.

Die Kultivierung von essbaren Wildpflanzen erfolgt in Deutschland in weiteren Gewächshaus- und Praxisversuchen.

Langfristig (3-5 Jahre nach Projektabschluss):

Die Kultivierung und der Anbau von essbaren Wildpflanzen wird in Deutschland in Praxisversuchen verifiziert und in die landwirtschaftliche Praxis überführt.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Auftragnehmer

Das Teilprojekt hat neue Boden-Pflanzen-Interaktionen über essbare Wildpflanzen aufgedeckt sowie wichtige Erkenntnisse bezüglich des Einflusses von bodenmikrobiellen Gemeinschaften auf die Pflanzenernährung und die Bodenfruchtbarkeit gewonnen. Mikrobielle Gemeinschaften in der Rhizosphäre waren als Fingerabdruck einzelner Pflanzenarten bislang vollkommen unzureichend erforscht und daher wurde in diesem Projekt eine direkte Anwendungsmöglichkeit als mikrobiologische Stimulatoren in der Landwirtschaft erarbeitet. Auch die Rückbesinnung auf wilde Pflanzenarten anstelle gezüchteter Arten für den Anbau findet erst seit kurzer Zeit statt und hat besonders bezüglich Ertragsleistung, Umweltschutz und Erhaltung der Biodiversität ein großes Potential. Neben diesen Forschungsleistungen sind vor allem die Transferleistungen (Weitergabe von Wissen und Know-How) und die Vernetzung von Wissenschaft und Praxis zu nennen, die zu großen wissenschaftlich angewandten Erfolgsaussichten führten:

Kurzfristig (1 Jahr nach Projektabschluss)

Internationaler Wissensaustausch durch bestehende und weiter zu entwickelnde Netzwerke
Förderung und Weiterbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses (Bachelor- und Master-Studierende sowie Doktorand*innen)

Wissensvermittlung durch Implementierung der Ergebnisse in die universitäre Lehre an der Bergischen Universität Wuppertal insbesondere innerhalb der Module „Bodenkunde“, „Boden und Wasser“, „Ökologie und Chemie des Bodens und angrenzender Ökosysteme“ und „Bodenschutz“ sowie an den anderen Partneruniversitäten

Mittelfristig (1-3 Jahre nach Projektabschluss)

Publikation von Ergebnissen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften
Einbettung der Forschungsergebnisse in nationale und internationale Initiativen
Studierende und Absolvent*innen fungieren als Multiplikatoren

Langfristig (3-5 Jahre nach Projektabschluss)

Etablierung einer neuen Forschungsrichtung über essbare Wildpflanzen
Verifizierung und Einführung der erzielten Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis

Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ist nicht bekannt.

Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Grammenou, A., **Petropoulos, S.A.**, Thalassinou, G., **Rinklebe, J.**, **Shaheen, S.M.**, Antoniadis et al., 2023. Biostimulants in the Soil–Plant Interface: Agro-environmental Implications-A Review. *Earth Syst Environ* 7, 583–600. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00349-x>
- Thalassinou, G., Levizou, E., **Rinklebe, J.**, **Shaheen, S.M.**, Antoniadis, V., 2024. Enhancing the phytoextraction of Cd, Cu, Pb, and Zn by *Portulaca oleracea* in a heavily contaminated soil using low molecular weight organic substances: Is phytoremediation viable? *Earth Syst Environ* 8, 923–936 (2024). <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00386-0>

Essbare Wildpflanzen (WEP) sind wenig genutzte pflanzliche Ressourcen. Sie werden häufig verzehrt, insbesondere in Zeiten der Nahrungsmittelknappheit, und gelten daher als potenzielle Lösung für die Überwindung der Nahrungsmittelknappheit. Daher sind innovative Studien und dringende Maßnahmen erforderlich, um die WEP-Ressourcen in den mediterranen und europäischen Ländern wirksam zu bewirtschaften. Der Anbau von WEPs in mediterranen und südeuropäischen Ländern ist weiter verbreitet als in mittel- und nordeuropäischen Ländern, einschließlich Deutschland. Die Eignung des Anbaus ausgewählter WEPs auf verschiedenen deutschen Böden ist bisher nicht untersucht worden. Ziel des Projektes war es daher, ausgewählte WEP-Arten auf verschiedenen deutschen Böden zu vermehren und zu kultivieren sowie die agronomische Leistung von WEP durch Gewächshaus- und Landwirtschaftsversuche zu beschreiben und zu bewerten, um die besten Praxisleitfäden für die Anforderungen der Pflanzen in Bezug auf Veränderungen der Bodentypen und ihrer Eigenschaften sowie des Gehalts an toxischen Elementen (TEs) zu erstellen. Um unsere Ziele und Aufgaben (Aufgaben 3.2, 3.3 und 3.4) im dritten Arbeitspaket des VALUEFARM-Projekts zu erreichen, haben wir ein Feld- und zwei Gewächshausexperimente wie folgt durchgeführt:

Aufgaben 3.2

1. Topfversuch

1.1. Methodik

Sechs Böden bzw. Substrate aus verschiedenen Regionen Deutschlands wurden beprobt: 1) ein künstlicher Boden, 2) zwei Ackerböden (aus Düsseldorf (D) und Rostock (R)), 3) ein Waldboden (aus Viersen (V)), 4) ein Gartenboden und 5) ein Grünland-Auenboden (aus Frankfurt (F)). Die Bodenproben wurden präpariert und die grundlegenden bodenphysikalisch-chemischen Eigenschaften (z. B. elektrische Leitfähigkeit, pH, organischer Kohlenstoff) gemäß der Standardmethode für Bodenanalysen (*Sparks et al., 1996*) charakterisiert. Das Saatgut von *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* und *Crithmum maritimum* wurde vom Projektpartner Spyridon A. Petropoulos, University of Thessaly (UTH), zur Verfügung gestellt. Die Keimungsrate aller Samen unter Laborbedingungen wurde untersucht. Im Anschluss wurde ein Gewächshaus-Topfexperiment durchgeführt, um den Einfluss von Bodentypen und -eigenschaften auf das Pflanzenwachstum der drei Pflanzen zu untersuchen ([Anhang A; Abb. S1](#)). Ein Blockversuch bestand aus 24 Behandlungen (3 Pflanzen in 6 Böden) mit jeweils vier Wiederholungen. Diese Anordnung ergab insgesamt 72 Töpfe (6 Böden x 3 Pflanzen x 4 Wiederholungen). Vier weitere Töpfe mit Düsseldorfer Ackerboden wurden mit *Portulaca oleracea* (gleiches Saatgut wie im Feldexperiment mit niedrigerer Keimungsrate) bepflanzt, die Erde wurde homogenisiert und in die Töpfe gegeben. Die Töpfe wurden mit Leitungswasser bewässert, um einen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 60 % der Feldkapazität zu erreichen. Eine Woche später wurden die gekeimten Samen gepflanzt. Während der Keimzeit wurde die Bodenfeuchtigkeit auf 80 % der Feldkapazität gehalten und nach dem Ausdünnen auf die Feldkapazität erhöht. Die Töpfe wurden mit Leitungswasser bewässert. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde durch tägliches Wiegen der Töpfe und Nachfüllen des verlorenen Wassers auf der Feldkapazität gehalten. Fünf Wochen nach der Keimung wurden die Töpfe mit 300 ml einer Nährlösung mit 0,8 g NH₄NO₃ pro L und 0,4 g HK₂PO₄ pro L (pH-Wert der Lösung = 7,22) bewässert. Die Portulak- und *Sonchus*-Pflanzen wurden 12 Wochen nach der Aussaat geerntet. *Crithmum maritimum* keimte später als *Portulaca oleracea* und *Sonchus oleracea* und wurde daher vier Wochen später geerntet. Die Portulakpflanzen auf dem Düsseldorfer Ackerboden wurden simultan mit den Portulak-Pflanzen des Feldexperiments nach 16 Wochen geerntet (siehe unten).

Die ganzen Pflanzen (Wurzeln, Stängel und Blätter) wurden geerntet und aus den Töpfen entfernt. Die Anzahl und Länge der Pflanzen (Wurzeln und oberirdische Biomasse) wurden gemessen. Die Pflanzen wurden gründlich mit Wasser gewaschen und 24 Stunden lang getrocknet, dann wurde das Frischgewicht bestimmt. Die Pflanzen wurden in Wurzeln, Stängel und Blätter zerlegt. Danach wurden die Pflanzenteile bis zu 4 Wochen an der Luft getrocknet. Die Trockenbiomasse wurde aufgezeichnet. Dann wurden die Proben für die Analyse im ICP-OES in einer Achatkugelmühle zu feinem Pulver zermahlen. Eine Teilprobe (0,25 g) der gemahlene Pflanzenteile (Wurzeln, Stängel und Blätter) wurde in einem Muffelofen bei 450°C fünf Stunden lang trocken verascht und mit 20%iger Salzsäure extrahiert (*Jones et al., 1991*). Der Nährstoff- und Spurenelementgehalt des Pflanzengewebes wurde mittels ICP-OES (Ultima 2, Horiba Jobin Yvon, Unterhaching, Deutschland) gemessen.

Bodenextraktion und -analytik

Die frischen Bodenproben und Rhizosphärenproben wurden gesammelt, behandelt und für chemische und mikrobielle Analysen aufbewahrt. Die Bodenproben wurden nach der Ernte aus den Töpfen entnommen, an der Luft getrocknet, durch ein 2-mm-Sieb gestrichen und hinsichtlich der grundlegenden physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften (z. B. EC, pH, SOC) nach der Standardmethode für Bodenanalysen (*Sparks et al., 1996*) charakterisiert. Der verfügbare organische Kohlenstoff- (CHWE) und Stickstoffgehalt in den sechs Böden aus dem Topfversuch wurde nach der Ernte mittels Heißwasser extrahiert und am C/N-Analysator (multi C/N, AnalytikJena, Jena, Deutschland) gemessen. Weitere pflanzenverfügbare Nährstoffe und Spurenelemente in den sechs Böden nach der Ernte wurden mit 1 M Ammoniumbicarbonat (NH_4HCO_3) + 0,005 M Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) extrahiert (*Soltanpour und Schwab, 1977*) und ebenfalls am ICP-OES gemessen.

1.2. Bisher erzielte Ergebnisse

1.2.1. Bodeneigenschaften und Gesamtelementgehalte

Die grundlegenden Eigenschaften der verwendeten Böden sind in [Tabelle 1](#) und [Tabelle S1](#) dargestellt. Die natürlichen Böden weisen einen pH-Wert von 4,2 beim Grünlandboden bis 6,6 beim Rostocker Ackerböden auf. Der ursprüngliche pH-Wert des künstlichen Bodens betrug 3,17, aber durch die Behandlung mit CaCO_3 (1 % w/w) wurde dieser neutralisiert, so dass der pH-Wert des karbonatisierten künstlichen Bodens 7,25 beträgt. Der Gesamtkohlenstoff war höher für den Gartenboden (19,8 %), den Rostocker Ackerboden (10,6 %) und den Grünlandboden (4,2 %) als für die anderen Böden (0,8-2,4 %). Die Garten-, Acker- und Grünlandböden enthielten mehr Phosphor, Kalium und Schwefel als die anderen Böden (Tabelle 1). Die Grünland- und Ackerböden enthielten einen höheren Gesamtgehalt an Aluminium, Eisen, Kobalt, Chrom, Nickel, Vanadium und Zink als die anderen Böden (Tabelle S1). Der Gehalt dieser Elemente lag jedoch deutlich unter den kritischen Konzentrationen (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV neue Fassung, (2021))). Diese Böden gelten daher nicht als verunreinigt.

1.2.2. Trockengewicht der Biomasse der untersuchten Pflanzen in allen Böden

Das Trockengewicht der Biomasse wurde für die drei verwendeten Pflanzenarten *Sonchus* ([Abb. 1](#)), *Crithmum* und *Portulaca* in den Topfversuchen mit sechs verschiedenen Böden gemessen. Das Trockengewicht der Wurzeln (roots), Stängel (stems) und Blätter (leaves) in den untersuchten Böden unterscheidet sich teils signifikant. Die Töpfe mit Garten- und Grünlandböden zeigten ein signifikant höheres Trockengewicht der *Sonchus*- und *Crithmum*-Pflanzen gegenüber den anderen untersuchten Böden. Das Trockengewicht der Portulakpflanzen in den beiden Ackerböden lag signifikant höher, als das der Pflanzen in den anderen Böden. Die höhere Biomasse der Pflanzen in den Garten-, Acker- und Grünlandböden im Vergleich zu den Wald- und Kunstböden ist kongruent mit höheren Gehalten an Makro- und Mikronährstoffen in eben jenen Böden ([Tab. 1](#) und [Tab. S1](#)).

Tabelle 1: Chemische Eigenschaften der in den Topfversuchen verwendeten Böden und deren Nährstoffe (gesamt); EC = elektrische Leitfähigkeit (electrical conductivity), TC = Gesamtkohlenstoff (total carbon)

Bodenbezeichnung	pH	EC	TC	Ca	P	Mg	K	S
		$\mu\text{S/cm}$	%	-----mg/kg-----				
Ackerboden Düsseldorf (arable soil D)	6,4	5,4	1,49	3696,1	867,5	LDL	2554,2	323,2
Ackerboden Rostock (arable soil R)	6,64	nd	10,6	1572,5	430,8	LDL	1772,7	137,6
Waldboden (Forest soil)	4,3	30,2	0,8	202,4	122,7	213,4	223,3	60,2
Grünlandboden (Grassland soil)	4,25	nd	4,25	3301,7	745,5	LDL	14408,1	558,5
Künstlicher Boden (artificial soil)	7,25	nd	2,43	565,8	316,2	351,0	350,9	121,3
Gartenerde (Garden soil)	6,4	131,6	19,79	7811,3	1102,8	1064,8	1089,6	1431,4

LDL= unterhalb des Messgrenze; nd: nicht gemessen

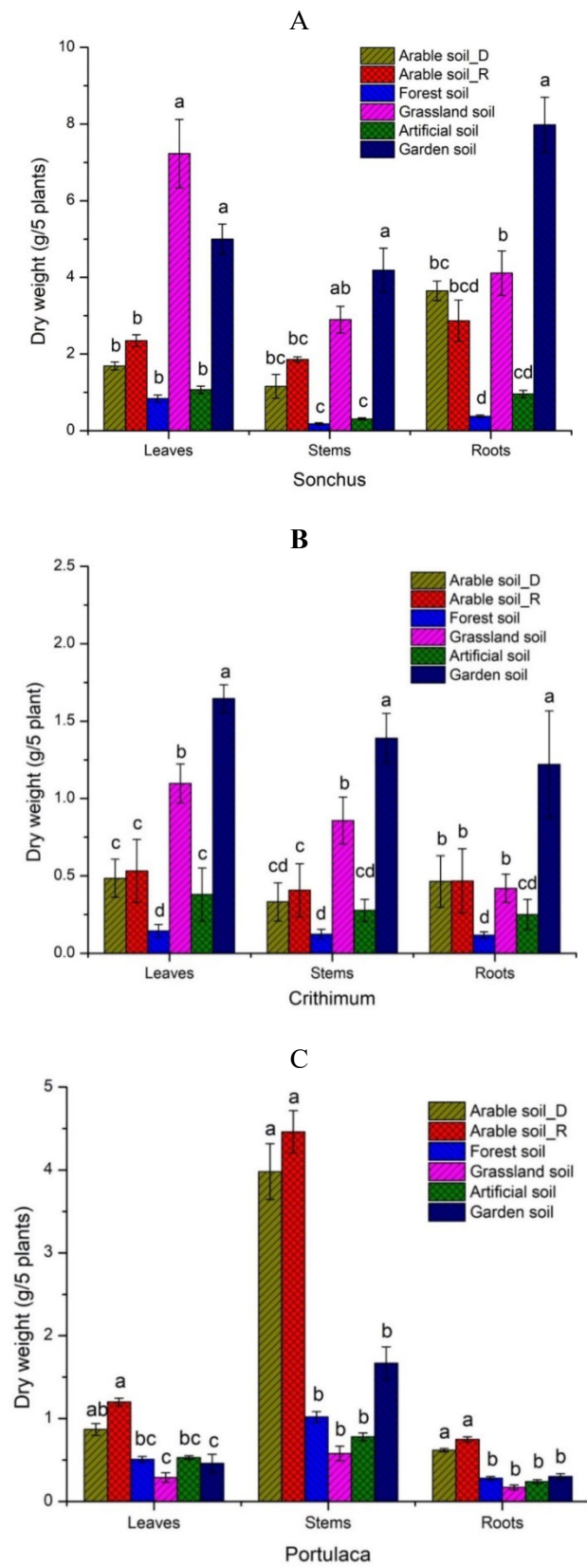


Abbildung 1: Trockengewicht der Biomasse (g/5 Pflanzen) unterteilt in Blätter (leaves), Stängel (stems) und Wurzeln (roots) im Topfversuch mit *Sonchus* (Abb. 1a) *Crithimum* (Abb. 1b), *Portulaca* (Abb. 1c) und den untersuchten Böden.

1.2.3. Verfügbarkeit der Nährstoffe und Spurenelemente in den untersuchten Böden in Abhängigkeit von Pflanzentyp und Wachstum

1.2.3.1. Bodennährstoffe (C, N, P, Ca, Mg, K, S)

Heißwasser extrahierbarer organischer Kohlenstoff (CHWE) und Stickstoff (NHWE)

Heißwasser extrahierbarer organischer Kohlenstoff (CHWE) und Stickstoff (NHWE) wurden in den sechs Böden des Topfversuchs nach der Ernte gemessen. Die sechs Böden wiesen sehr unterschiedliche CHWE- und NHWE-Gehalte auf (Abb. 2a,b). Der CHWE-Gehalt war im organischen Material (GAS) mit Abstand am höchsten, gefolgt vom Grünlandboden (GRS) und dem künstlichen Boden (AFS). Der Waldboden (FS) und die Ackerböden (ASD und ASR) wiesen den niedrigsten CHWE-Gehalt auf. Der CHWE-Gehalt war in GRS, wo Portulak angebaut wurde, höher als in demselben Boden, der mit Sonchus oder Crithmum angebaut wurde (nicht signifikant). Im Gegensatz dazu wiesen ASD und ASR, die mit Sonchus und Crithmum angebaut wurden, höhere CHWE-Gehalte auf als der gleiche Boden unter Portulak. In AFS zeigte der CHWE-Gehalt die Tendenz Portulak > Crithmum > Sonchus. Die CHWE-Gehalte für FS und GRS waren für die drei Pflanzenarten ähnlich. Der Trend der CHWE-Gehalte in den sechs Böden war mit Ausnahme von FS mit dem Trend des Gesamtkohlenstoffgehalts (TC) vergleichbar. Im FS war der TC-Gehalt im Vergleich zu den anderen Böden am niedrigsten, nicht aber der CHWE-Gehalt. Im Allgemeinen war der nach der Kultivierung gemessene CHWE-Gehalt höher als der TC-Gehalt vor der Kultivierung, was durch direkte Pflanzenexsudate oder durch Mikroben, die diese Exsudate umwandeln, erklärt werden kann. In vielen Studien wurde festgestellt, dass der CHWE-Gehalt gut mit dem Kohlenstoffgehalt der mikrobiellen Biomasse korreliert und die labile Kohlenstofffraktion der organischen Substanz umfasst, die in enger Beziehung zur Mikroaggregation steht. Daher steht der CHWE-Gehalt in direktem Zusammenhang mit der Bodenqualität. In unserer Studie hatte die Pflanzenart einen geringen Einfluss auf den CHWE-Gehalt.

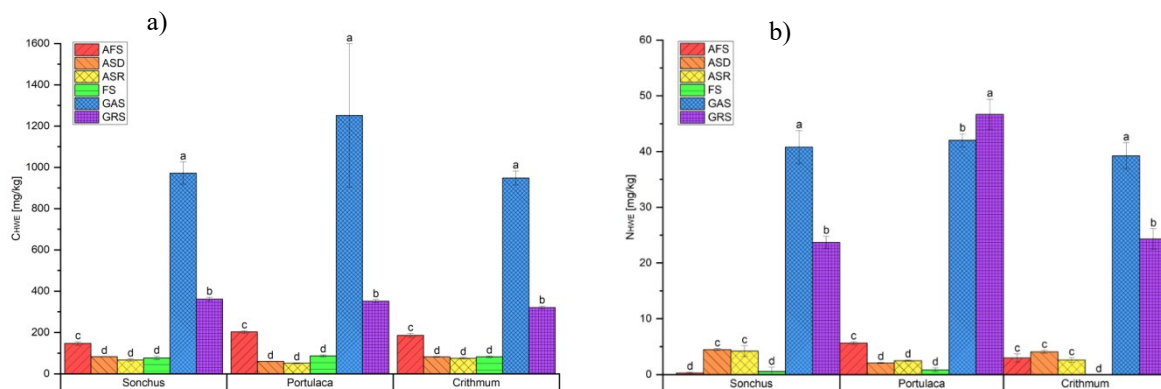


Abbildung 2: a) In heißem Wasser extrahierbarer Kohlenstoff (CHWE) und b) in heißem Wasser extrahierbarer Stickstoff (NHWE) in den sechs Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS - Waldboden, GAS - Gartenerde"/organisches Material, GRS - Grünlandboden), die mit *Sonchus oleraceus*, *Portulaca oleracea* und *Crithmum maritimum* im Topfversuch angebaut wurden.

Der NHWE-Gehalt war in GAS und GRS bei weitem am höchsten, während AFS, ASD, ASR und FS niedrigere NHWE-Gehalte aufwiesen. Der Trend war im Vergleich zum CHWE-Gehalt sowohl für die sechs Böden als auch für die drei Pflanzenarten unterschiedlich. Die drei Pflanzenarten beeinflussten den NHWE-Gehalt stärker als den CHWE-Gehalt (Abb. 2a). Der NHWE-Gehalt im GRS, der mit Portulak angebaut wurde, war signifikant höher als im gleichen Boden, der mit Sonchus oder Crithmum angebaut wurde. Ähnliche Ergebnisse wurden für AFS und FS gefunden. ASR, der mit Sonchus angebaut wurde, wies einen höheren NHWE-Gehalt auf, als der gleiche mit Portulak oder Crithmum angebaute Boden. Mit Sonchus oder Crithmum angebaute ASD zeigte einen höheren NHWE-Gehalt als der gleiche mit Portulak angebaute Boden. Unsere Ergebnisse deuten auf komplexe Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben hin, die sich wahrscheinlich aufgrund unterschiedlicher Bodentexturen sowie unterschiedlicher Nährstoffgehalte und pH-Werte zwischen den sechs Böden unterscheiden.

Phosphor & Kalium

Der potenziell verfügbare Gehalt an Phosphor (P) variierte in den untersuchten Böden unter den drei Anbaupflanzen deutlich (Abb. 3). Die Acker-, Garten- und Grünlandböden enthielten höhere Gehalte an DTPA-extrahierbarem P als die Wald- und Kunstböden. Die P-Verfügbarkeit war unter Portulak- und Crithmum-Pflanzen höher als unter Sonchus-Pflanzen.

Die verfügbaren Gehalte an Kalium (K) in den untersuchten Böden unterschieden sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 3). Der Grünlandboden enthielt unter den drei Pflanzen den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem K, gefolgt vom Ackerboden aus Rostock unter Crithmum- und Sonchus-Pflanzen und vom Gartenboden unter den Portulak-Pflanzen. Der Waldboden enthielt unter den drei Pflanzen den geringsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem K. Vor allem im Grünlandboden war die K-Verfügbarkeit unter Crithmum-Pflanzen höher, gefolgt von Portulak- und Sonchus-Pflanzen.

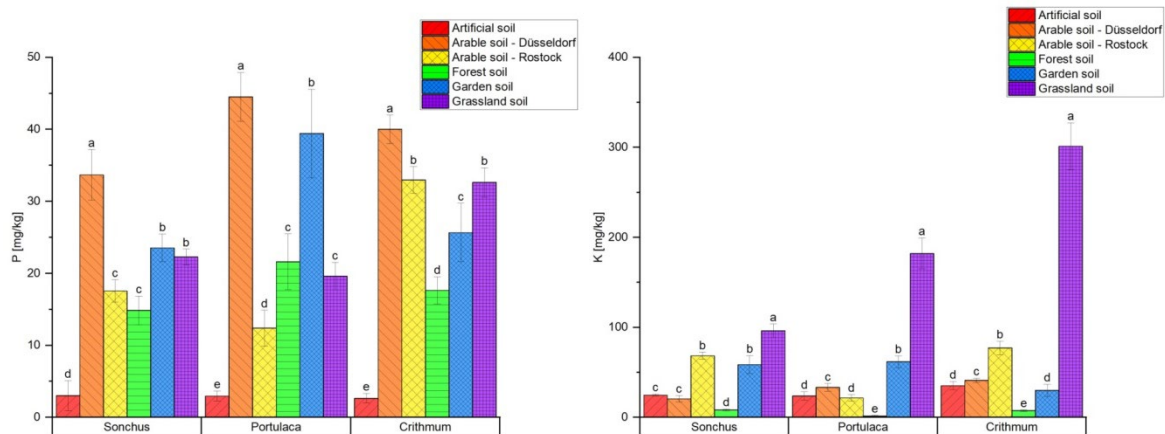


Abbildung 3: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Phosphor und Kalium in den untersuchten Böden

Kalzium, Magnesium, & Schwefel

Der potenziell verfügbare Gehalt an Calcium (Ca) in den untersuchten Böden unterschied sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 4). Der Gartenboden und der Ackerboden aus Rostock enthielten den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Ca bei Anbau mit Sonchus-Pflanzen, während der künstliche Boden den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Ca bei Anbau mit Portulak-Pflanzen enthielt. Die Ackerböden aus Düsseldorf und Grünlandböden wiesen mittlere Gehalte des DTPA-extrahierbaren Ca unter den drei Pflanzen auf. Der Waldboden enthielt den niedrigsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Ca unter den drei Pflanzen. Die Ca-Verfügbarkeit war überwiegend höher unter Sonchus-Pflanzen, gefolgt von Portulak- und Crithmum-Pflanzen.

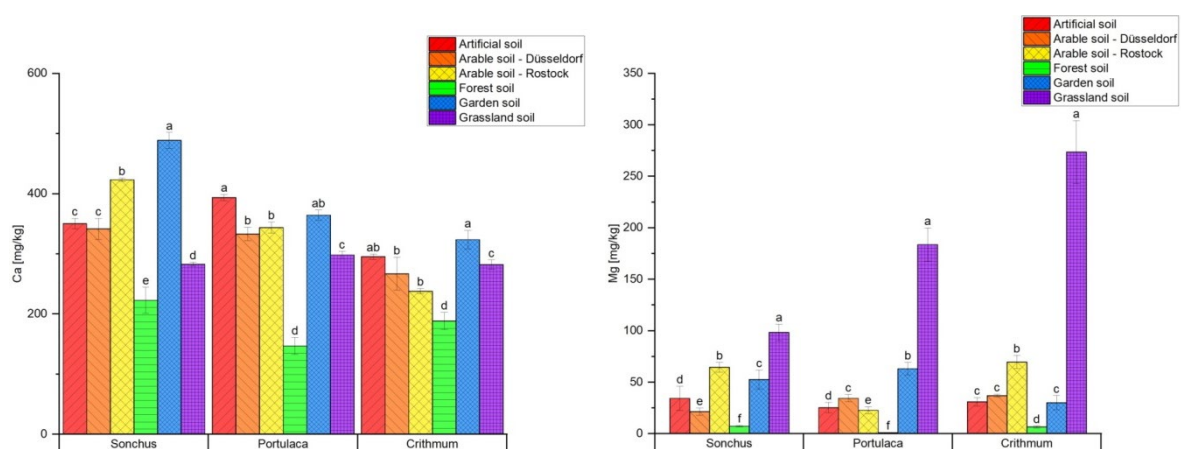


Abbildung 4: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Kalzium und Magnesium in den untersuchten Böden

Ähnlich wie bei K, enthielt der Grünlandboden unter den drei Pflanzen den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Mg (Abb. 4), gefolgt vom Ackerboden aus Rostock unter Crithmum- und Sonchus-Pflanzen und vom Gartenboden unter den Portulak-Pflanzen. Der Waldboden enthielt unter den drei Pflanzen den geringsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Mg. Vor allem im Grünlandboden war die Mg-Verfügbarkeit unter Crithmum-Pflanzen höher, gefolgt von Portulak- und dann Sonchus-Pflanzen. Der potenziell verfügbare Gehalt an Schwefel (S) in den untersuchten Böden unterschied sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 5). Die Grünland- und Gartenböden enthielten den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem S unter den Crithmum- und Portulak-Pflanzen, während die Garten- und Kunstböden den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem S unter den Sonchus-Pflanzen enthielten. Die Ackerböden enthielten den geringsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem S unter den drei Pflanzen. Die Verfügbarkeit von S war unter Portulak-Pflanzen höher als unter Crithmum- und Sonchus-Pflanzen.

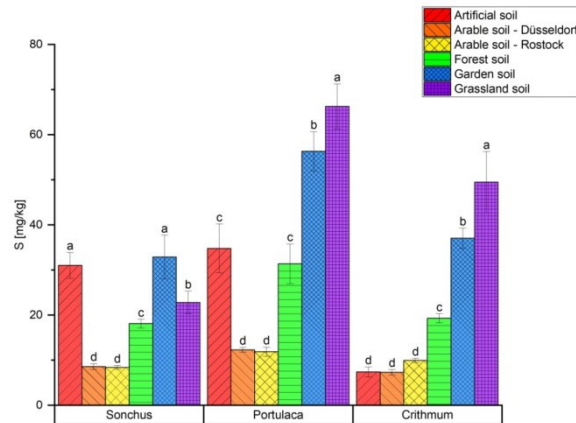


Abbildung 5: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Schwefel in den untersuchten Böden

1.2.3.2. Spurenelemente und potenziell toxische Elemente (Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)

Die potenziell verfügbaren Gehalte an Aluminium (Al) und Chrom (Cr) in den untersuchten Böden unterschieden sich unter den drei angebaute Pflanzen deutlich (Abb. S2 für Al; Abb. S3 für Cr). Offensichtlich enthielt der Waldboden den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Al, gefolgt von den Grünland- und Gartenböden unter den drei Pflanzen. Die Acker- und Kunstböden enthielten die geringsten Gehalte an DTPA-extrahierbarem Al. Insbesondere im Waldboden war die Al-Verfügbarkeit unter Portulak-Pflanzen signifikant höher, gefolgt von Crithmum- und Sonchus-Pflanzen.

Die potenziell verfügbaren Gehalte an Kupfer (Cu) in den untersuchten Böden unterschieden sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 6). Die Grünland-, Wald- und Ackerböden (nur Düsseldorf) enthielten die höchsten Gehalte an DTPA-extrahierbarem Cu, während die Garten- und Kunstböden die geringste Cu-Verfügbarkeit unter den drei Pflanzen aufwiesen. Die Cu-Verfügbarkeit war unter Crithmum höher als unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen im Grünlandboden, und umgekehrt im Ackerboden aus Düsseldorf.

Der potenziell verfügbare Gehalt an Eisen (Fe) in den untersuchten Böden unterschied sich unter den drei Anbaupflanzen deutlich (Abb. 6). Der Waldboden enthielt den höchsten Gehalt an DTPA-extrahierbarem Fe, gefolgt vom Grünlandboden und vom Ackerboden aus Rostock. Die Kunst- und Gartenböden enthielten die niedrigsten Gehalte an DTPA-extrahierbarem Fe. Insbesondere im Waldboden war die Fe-Verfügbarkeit unter Portulak-Pflanzen deutlich höher, gefolgt von Crithmum- und dann Sonchus-Pflanzen, während sie im Grünlandboden unter Crithmum-Pflanzen höher war als unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen.

Der potenziell verfügbare Gehalt an Mangan (Mn) in den untersuchten Böden unterschied sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 6). Die Garten- und Grünlandböden enthielten die höchste Menge an DTPA-extrahierbarem Mn, während die künstlichen Böden unter den drei Pflanzen die geringste Menge an DTPA-extrahierbarem Mn enthielten. In den Garten- und Grünlandböden war die Mn-Verfügbarkeit unter Portulak-Pflanzen höher als unter Crithmum- und Sonchus-Pflanzen.

Die potenziell verfügbaren Gehalte an Nickel (Ni) in den untersuchten Böden unterschieden sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 6). Die Grünlandböden und die Ackerböden aus Düsseldorf enthielten die höchste Menge an DTPA-extrahierbarem Ni, während der künstliche Boden unter den drei Pflanzen die geringste Ni-Verfügbarkeit aufwies. Die Ni-Verfügbarkeit war unter Crithmum-

Pflanzen höher als unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen im Grünlandboden, während sie unter Portulak-Pflanzen höher war als unter Sonchus- und Crithmum-Pflanzen in den Ackerböden aus Düsseldorf.

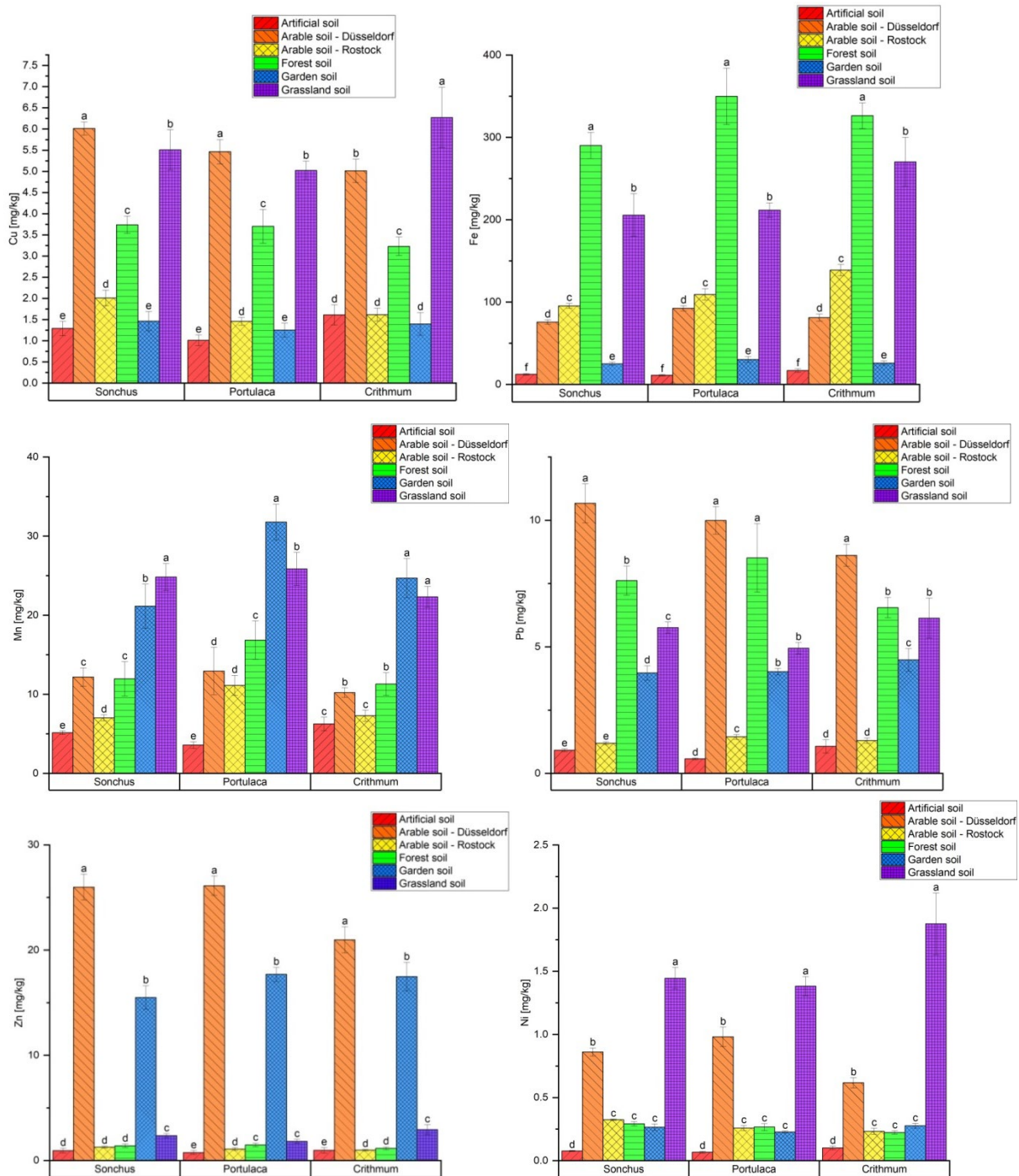


Abbildung 6: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Cu, Fe, Mn, Pb, Zn und Ni in den untersuchten Böden

Der potenziell verfügbare Gehalt an Blei (Pb) in den untersuchten Böden unterschied sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. S4). Die Ackerböden aus Düsseldorf, sowie die Wald- und Grünlandböden enthielten die höchste Menge an DTPA-extrahierbarem Pb, während der Kunstboden unter den drei Pflanzen die geringste Pb-Verfügbarkeit aufwies. Die Pb-Verfügbarkeit war unter Sonchus- und Portulak-Pflanzen höher als unter Crithmum-Pflanzen in den Ackerböden aus Düsseldorf, während sie im Waldboden unter Portulak-Pflanzen höher war als unter Sonchus- und Crithmum-Pflanzen.

Die potenziell verfügbaren Gehalte an Zink (Zn) in den untersuchten Böden unterschieden sich unter den drei Kulturpflanzen deutlich (Abb. 6). Die Ackerböden aus Düsseldorf und die Gartenböden enthielten signifikant höhere Mengen an DTPA-extrahierbarem Zn als die anderen Böden unter den drei Pflanzen. Insbesondere in den Ackerböden aus Düsseldorf war die Zn-Verfügbarkeit unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen höher als unter Crithmum-Pflanzen, während sie im Gartenboden unter Crithmum-Pflanzen höher war als unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen.

Aufgaben 3.2

2. Feldversuch

2.1. Methodik

Der Feldversuch wurde in einem landwirtschaftlichen Betrieb in der Nähe von Düsseldorf durchgeführt. Eine Parzelle des Hofes wurde mit Saatgut der griechischen Pflanzenart *Portulaca oleracea* bepflanzt (der gleiche Boden und dasselbe Saatgut wurden auch für vier Replikate im Topfversuch verwendet). Es wuchsen einheimische, wilde Portulak-Pflanzen (nicht bestimmt) auf der gleichen Fläche in Düsseldorf. Ziel dieses Versuchs war es, 1) die Ergebnisse des Topfexperiments unter Feldbedingungen zu überprüfen und 2) den angebauten Portulak (aus Griechenland) mit den heimischen Wildpflanzen zu vergleichen. Die Portulak-Pflanzen aus dem Topfversuch mit Düsseldorfer Ackerboden wurden zum gleichen Zeitpunkt wie die Feldpflanzen geerntet (16 Wochen). Es wurden vier Teilparzellen (jede ist ca. 1 m² groß) ausgewählt. Von den Kultur- und Wildpflanzen wurden jeweils vier Pflanzen (Wurzeln + Stängel + Blätter) geerntet. Die Anzahl und Länge der Pflanzen (Wurzeln und oberirdische Biomasse) wurden gemessen. Die Pflanzen wurden gründlich mit Wasser gewaschen und 24 Stunden lang getrocknet, dann wurde das Frischgewicht bestimmt. Die Pflanzen wurden in Wurzeln, Stängel und Blätter zerlegt. Danach wurden die Pflanzenteile bis zu 4 Wochen an der Luft getrocknet. Die Trockenbiomasse wurde aufgezeichnet. Dann wurden die Proben in einer Achatkugelmühle zu feinem Pulver zermahlen und bis zur Analyse gelagert. Die frischen Bodenproben und Rhizosphärenproben wurden gesammelt, behandelt und für chemische und mikrobielle Analysen aufbewahrt.

2.2. Wichtige Ergebnisse

2.2.1. Frisch- und Trockengewicht der Biomasse der Portulak-Pflanzen im Topf und im Freiland

Die Daten in [Abbildung 7](#) zeigen deutlich, dass das Gewicht der frischen und trockenen Biomasse der Portulak-Pflanzen vom Feldexperiment deutlich höher war, als das der Portulak-Pflanzen aus dem Topfversuch.

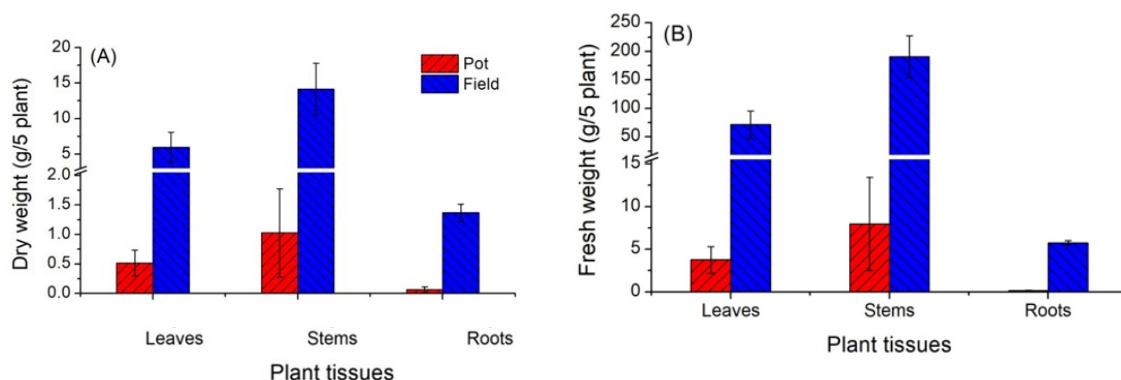


Abbildung 7: Vergleich von Trockengewicht (A) und Frischgewicht (B) (g/5 Pflanzen) der Blätter (leaves), Stängel (stems) und Wurzeln (roots) von *Portulaca oleracea* im Feldversuch (blau) und Topfversuch (rot).

2.2.2. Trockengewicht der Biomasse von griechischem und wildem Portulak auf dem Feld

Abbildung 8 zeigt Fotos der griechischen und einheimischen wilden Portulak-Pflanzen auf dem Feld. Die Daten in [Abbildung S6](#) zeigen, dass *Portulaca oleracea* ein signifikant höheres Gewicht an frischer und trockener Biomasse produzierte als die einheimischen wilden Portulak-Pflanzen.

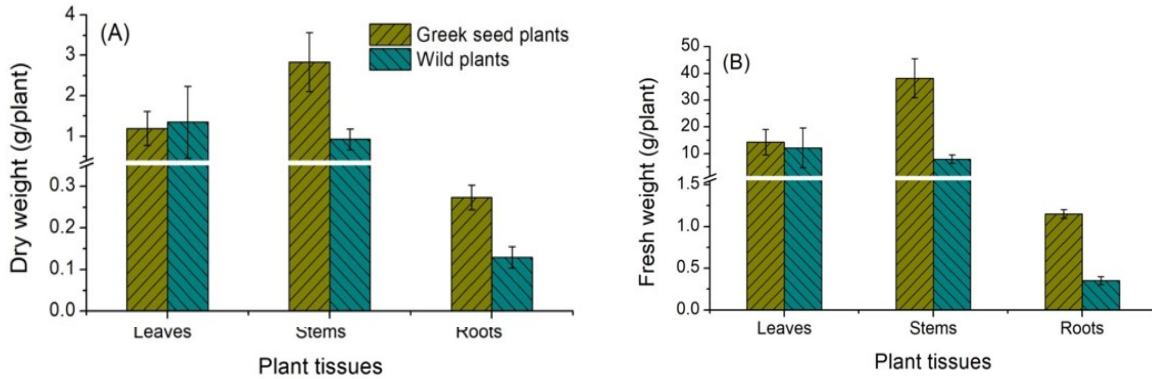


Abbildung 8: Trockengewicht (A) und Frischgewicht (B) (g/5 Pflanzen) unterteilt in Blätter (leaves), Stängel (stems) und Wurzeln (roots) von *Portulaca oleracea* (Greek seed plants) und einheimisch-wildem Portulak (Wild plants) im Feldversuch

Portulak-Pflanzentyp und Wachstum beeinflussten Elementverfügbarkeit im untersuchten Ackerboden

Die potentielle Verfügbarkeit der untersuchten Nährstoffe und Elemente im untersuchten Boden (Ackerboden aus Düsseldorf) unterschied sich signifikant zwischen den Portulak-Pflanzen mit griechischem Zuchttyp und deutschem Wildtyp ([Abb. 9](#)). Unter den untersuchten Nährstoffen und Elementen wies Ca die höchste potenzielle Verfügbarkeit auf, gefolgt von Fe, P, Mg, K, Zn, Mn, Pb, S, Cu, V, Ni, Cd, Cr und Co. Die Verfügbarkeit der untersuchten Nährstoffe und Elemente unterschied sich in der Rhizosphäre von griechischem und deutschem Portulak erheblich ([Abb. 9](#)). Zum Beispiel war die Verfügbarkeit von P, K und Ca unter deutschem Portulak Wildtyp höher als unter griechischem Portulak und umgekehrt bei den anderen Elementen. Die Unterschiede waren bei Ca, Fe, Mn, Cd, Cr, Ni, Pb, V und Zn signifikant, während sie bei den anderen Elementen nicht signifikant waren ([Abb. 9](#)).

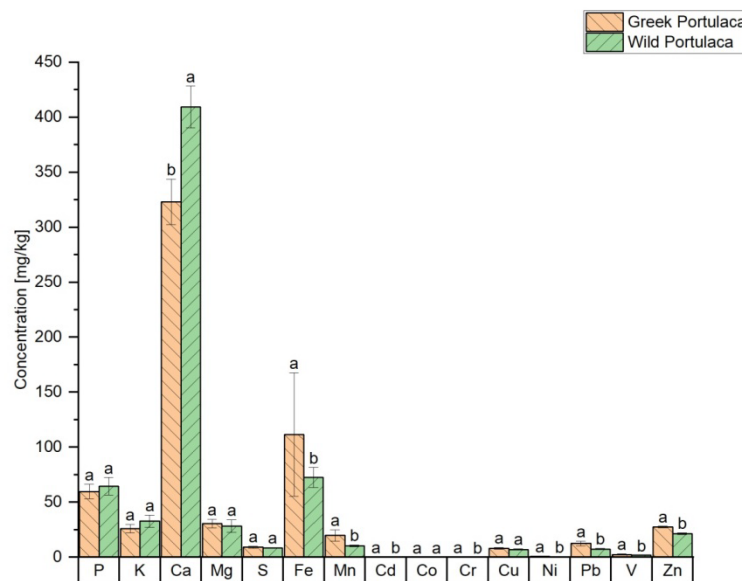


Abbildung 9: Die potentielle Verfügbarkeit der untersuchten Nährstoffe und Elemente im Ackerboden-Düsseldorf unter griechischem und wildem Portulak.

Aufgaben 3.3

Sammlung und Charakterisierung des Bodens

Um die Aufgabe 3.3 in WP3 zu erfüllen, sammelten wir zwei kontaminierte Auenböden, die hoch und mäßig mit toxischen Elementen (z.B. As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb und Zn) belastet waren. Der hoch belastete Boden wurde aus dem Pescher Busch, NRW, Deutschland, entnommen und mit (PB-Boden) abgekürzt, der mäßig belastete Boden wurde aus Hasenmühle, NRW, Deutschland, entnommen und mit (HM-Boden) abgekürzt.

Die Bodenproben wurden an der Luft getrocknet, durch ein 2-mm-Sieb gesiebt und anhand der Standardmethode für die Bodenanalyse (*Sparks et al., 2020*) auf grundlegende bodenphysikochemische Eigenschaften (z. B. EC, pH, SOC) untersucht. Der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff in den beiden Böden wurde mit dem C/N-Analysator (multi C/N, AnalytikJena, Jena, Deutschland) gemessen. Die grundlegenden Bodeneigenschaften sind in Tabelle S2 aufgeführt.

Die Bodenproben wurden mit HCl und HNO₃ unter Verwendung einer Mikrowelle (Milestone; ETHOS EASY, Deutschland) aufgeschlossen, um den Gehalt an Pseudo-Gesamtelementen zu bestimmen (*USEPA, 2007*). Der verfügbare Gehalt an toxischen Elementen in den beiden Böden wurde mit 1 M Ammoniumbicarbonat (NH₄HCO₃) + 0,005 M Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) extrahiert (*Soltanpour und Schwab, 1977*). Der PB-Boden war stärker kontaminiert als der HM-Boden, insbesondere mit As, Cu, Cd, Cr, Pb und Zn ([Abb.10-13](#); [Abb. S10-23](#)).

Gewächshaus-Topfversuch

Die Samen von *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus*, *Scolymus hispanicus* und *Plantago weldenii* wurden vom Projektpartner Spyridon A. Petropoulos, Universität von Thessalien (UTH), zur Verfügung gestellt. Obwohl *Plantago weldenii* ursprünglich nicht im Projektvorschlag enthalten war, haben wir es in den Versuch einbezogen, um sein Potenzial zur PTE-Akkumulation im Vergleich zu *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* und *Scolymus hispanicus* zu bewerten. Die Keimungsrate aller Samen wurde unter Laborbedingungen untersucht. Anschließend wurde ein Gewächshaustopfexperiment durchgeführt, um den Einfluss der Bodenkontamination durch toxische Elemente auf das Pflanzenwachstum der vier Pflanzen zu untersuchen.

Ein vollständiger randomisierter Blockaufbau bestand aus 2 Pflanzen in PB-Erde x fünf Wiederholungen und 4 Pflanzen in HM-Erde x fünf Wiederholungen. Diese Anordnung führte zu insgesamt 30 Töpfen. Die Erde wurde gründlich gemischt und in die Töpfe gegeben ([Abb. S6-S9](#)). Die Töpfe wurden mit Leitungswasser bewässert, um einen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 60 % der Feldkapazität zu erreichen. Eine Woche später wurde das gekeimte Saatgut gepflanzt. Während der Keimung wurde die Bodenfeuchtigkeit auf 80 % der Feldkapazität gehalten und nach dem Ausdünnen auf die Feldkapazität angehoben. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde durch tägliches Wiegen der Töpfe und Nachfüllen des verlorenen Wassers auf der Feldkapazität gehalten. Die Pflanzen wurden 12 Wochen nach der Aussaat geerntet.

Die ganzen Pflanzen (Wurzeln + Spross) wurden geerntet und aus den Töpfen entfernt. Die Anzahl und Länge der Pflanzen (Wurzeln und Spross) wurden gemessen. Die Pflanzen wurden gründlich mit Wasser gewaschen und 24 Stunden lang getrocknet; dann wurde das Frischgewicht bestimmt. Die Pflanzen wurden in Wurzeln und Sprossen (oberirdische Biomasse) zerlegt. Danach wurden die Pflanzenteile bis zu 4 Wochen an der Luft getrocknet. Die Trockenbiomasse wurde aufgezeichnet, die Proben anschließend in einer Achatkugelmühle zu feinem Pulver zermahlen und bis zur Analyse gelagert.

Für jedes Replikat wurden 0,5 g des Pflanzenmaterials fünf Stunden lang bei 550 °C trocken verascht und mit 20 % HCl extrahiert (*Jones et al., 1991*). Die Bodenproben wurden nach der Ernte aus den Töpfen entnommen, an der Luft getrocknet und durch ein 2-mm-Sieb gestrichen, bevor sie auf pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (EC) gemäß *Sparks et al. (1996)* analysiert wurden. Die Gesamtelemente wurden nach dem zuvor beschriebenen Verfahren gemäß US EPA 3051a (2007) analysiert. Die Böden wurden weiter mit AB-DTPA (*Soltanpour und Schwab, 1977*) extrahiert. Die Elementanalysen der Pflanzen- und Bodenextrakte wurden mittels induktiv gekoppelter Plasma-optischer Emissionsspektroskopie (ICP-OES) durchgeführt (Ultima 2, Horiba Jobin Yvon, Unterhaching, Deutschland).

Gehalte der Nährstoffe, Spuren- und potentiell toxischen Elementen in Böden und Pflanzen

Der PB wies signifikant höhere Gehalte an Gesamtelementen ([Abb. 10-23A](#)) und verfügbaren Elementen ([Abb. 10-23B](#)) auf als der HM-Boden, insbesondere an As, Cu, Cd, Cr, Pb und Zn. *Portulaca-*

, Scolymus- und Plantago-Pflanzen akkumulierten in beiden Böden einen signifikant höheren P-Gehalt als Sonchus-Pflanzen, wobei der Gehalt in den Sprossen höher war als in den Wurzeln (Abb. S10C). Portulaca-Pflanzen enthielten den höchsten K- (Abb. S10) und Mg-Gehalt (Abb. S11), gefolgt von Scolymus-, Sonchus- und Plantago-Pflanzen. Der K-Gehalt der Sprossen war bei allen Pflanzen höher als der der Wurzeln (Abb. S10). Scolymus- und Plantago-Pflanzen reicherten einen signifikant höheren S-Gehalt an als Sonchus- und Portulaca-Pflanzen und der S-Gehalt der Sprosse war bei allen Pflanzen höher als der der Wurzeln (Abb. S13). Obwohl der Gesamtgehalt an Fe (Abb. 10), Mn (Abb. 10) und Zn (Abb. 11) im PB-Boden signifikant höher war als im HM-Boden, war die Verfügbarkeit beider Metalle im HM-Boden signifikant höher als im PB-Boden, was durch den niedrigeren pH-Wert im HM-Boden als im PB-Boden erklärt werden könnte (Tabelle S2).

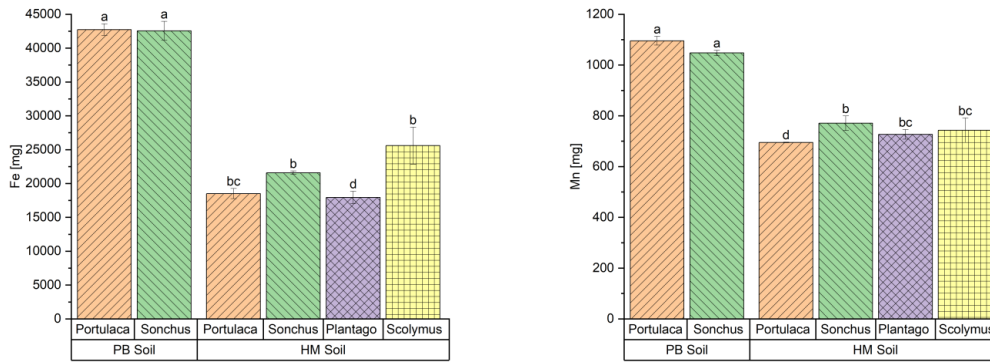
Scolymus- und Plantago-Pflanzen akkumulierten einen signifikant höheren Fe-Gehalt als Sonchus- und Portulaca-Pflanzen, wobei der Gehalt in den Wurzeln bei allen Pflanzen deutlich höher war als in den Sprossen (Abb. 10C). Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten in PB-Böden mit einem Gehalt von bis zu 1100,0 mg Mn/kg Boden nicht viel Mn (Abb. 10A). Scolymus phytoextrahiert Mn und verlagert es von den Wurzeln zu den Sprossen. Plantago-Pflanzen konnten Mn in den Wurzeln akkumulieren (Abb. 10C). Portulaca- und Sonchus-Pflanzen konnten in einem Boden wachsen, der bis zu 3200 mg Cu/kg Boden enthält (Abb. 11). Portulaca-, Sonchus- und Plantago-Pflanzen können zur Phytostabilisierung von Cu verwendet werden (Abb. 11C). Die Zn-Verfügbarkeit war in den HM-Böden mit niedrigerem Gesamtgehalt (saurer pH-Wert) höher (Abb. 11A-B). Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten Zn in PB-Böden mit einem Gehalt von bis zu 1075,0 mg Zn/kg Boden nicht stark (Abb. 11A-C). Scolymus-Pflanzen konnten Zn phytoextrahieren und von den Wurzeln in die Sprosse verlagern. Plantago-Pflanzen konnten Zn in den Wurzeln akkumulieren (Abb. 11C). Obwohl die Böden insgesamt Ag enthielten, lagen die verfügbaren und pflanzlichen Konzentrationen unter den Nachweisgrenzen (Abb. S14). Scolymus- und Plantago-Pflanzen akkumulierten signifikant höhere Al-Gehalte als Sonchus- und Portulaca-Pflanzen, wobei der Gehalt in den Wurzeln bei allen Pflanzen deutlich höher war als in den Sprossen (Abb. S15).

Obwohl die Böden As enthielten, lagen die Pflanzenkonzentrationen unter den Nachweisgrenzen (Abb. S16). Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten Cd in PB-Böden mit einem Gehalt von bis zu 6,6 mg Cd/kg Boden nicht stark (Abb. 12). Scolymus- und Sonchus-Pflanzen konnten Cd phytoextrahieren und von den Wurzeln in die Sprosse verlagern (Abb. 12C). Plantago-Pflanzen konnten Cd ebenfalls in den Wurzeln akkumulieren. Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten Co in PB-Böden mit einem Gehalt von bis zu 20,0 mg Co/kg Boden nicht stark. Scolymus-Pflanzen phytoextrahierten Co und verlagert es von den Wurzeln in die Sprosse. Plantago-Pflanzen konnten Co in den Wurzeln akkumulieren (Abb. S17). Die Verfügbarkeit von Cr war in HM-Böden mit niedrigerem Gesamtgehalt (saurer pH-Wert) höher. Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten Cr in PB-Böden mit einem Gehalt von bis zu 600,0 mg Cr/kg Boden nicht in hohem Maße, während Scolymus- und Plantago-Pflanzen Cr in den Wurzeln stark anreicherten (Abb. 12). Obwohl die Böden insgesamt Mo enthielten, lagen die verfügbaren und pflanzlichen Konzentrationen unter den Nachweisgrenzen (Abb. S18). Die Ni-Verfügbarkeit war in HM-Böden mit niedrigerem Gesamtgehalt (saurer pH-Wert) höher. Portulaca- und Sonchus-Pflanzen akkumulierten in PB-Böden, die bis zu 80,0 mg Ni/kg Boden enthielten, nicht viel Ni (Abb. 13). Dagegen phytoextrahierten Scolymus- und Plantago-Pflanzen Ni und verlagerten es von den Wurzeln zu den Sprossen (Abb. 13). Die Pb-Verfügbarkeit war in HM-Böden mit niedrigerem Gesamtgehalt (saurer pH-Wert) höher. Sonchus-Pflanzen akkumulierten Pb in PB-Böden, die bis zu 450,0 mg Pb/kg Boden enthielten, nicht stark. Plantago- und Portulaca-Pflanzen akkumulierten Pb in den Wurzeln (Abb. 13).

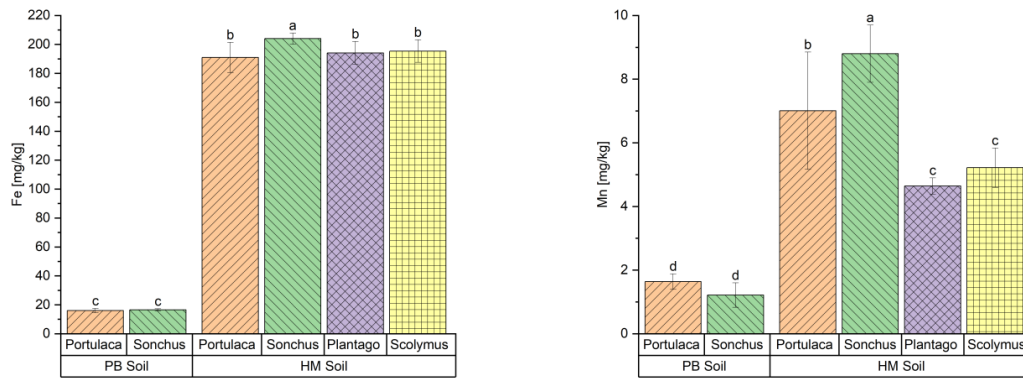
Auf der Grundlage der oben genannten Ergebnisse können wir zusammenfassen, dass Portulaca-, Sonchus-, Plantago- und Scolymus-Pflanzen unter TE-Kontaminationsstress wachsen und zur Phytosanierung von TE-kontaminierten Böden eingesetzt werden können; ihre Phytoextraktions- und Translokationseffizienz ist jedoch elementspezifisch, z.B.:

Portulaca-, Sonchus- und Plantago-Pflanzen können für die Phytostabilisierung von Cu verwendet werden. Scolymus- und Sonchus-Pflanzen können Cd akkumulieren und es von den Wurzeln in die Sprosse verlagern. Plantago-Pflanzen können Cd, Co und Zn in den Wurzeln anreichern. Scolymus-Pflanzen akkumulieren Co und Zn und verlagert beides von den Wurzeln in die Sprosse. Scolymus- und Plantago-Pflanzen können Cr in hohem Maße in den Wurzeln akkumulieren. Scolymus- und Plantago-Pflanzen akkumulieren Ni und verlagern es von den Wurzeln in die Sprosse. Plantago- und Portulaca-Pflanzen akkumulieren Pb in den Wurzeln.

A



B



C

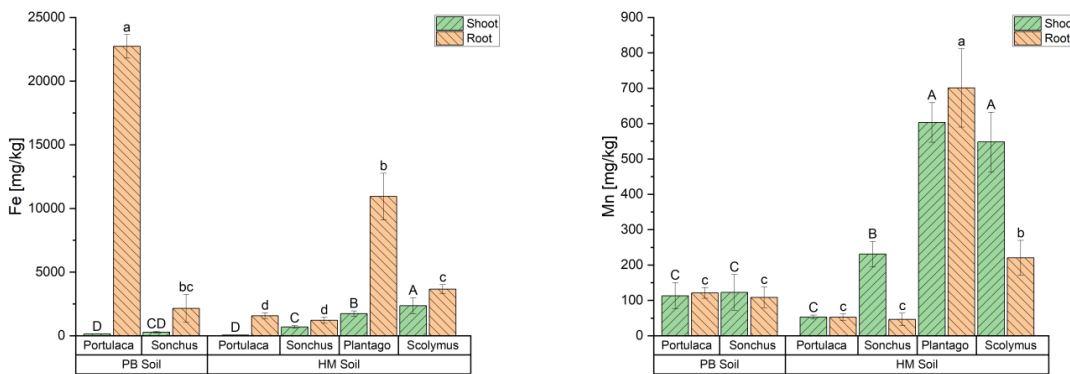
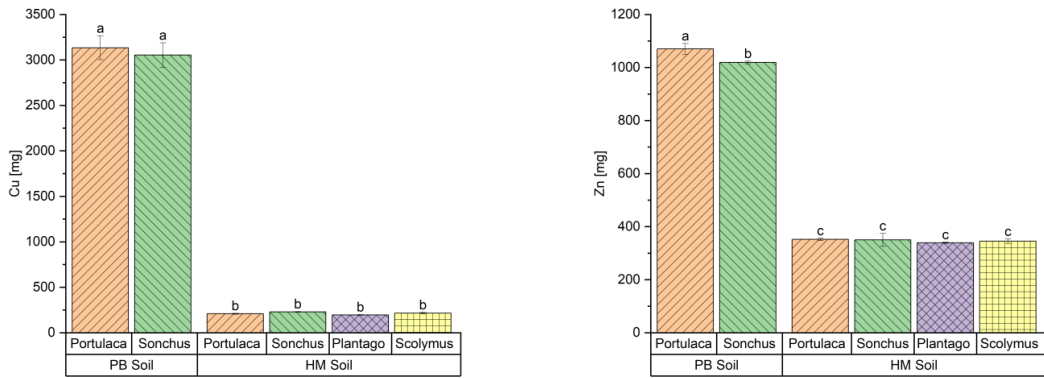
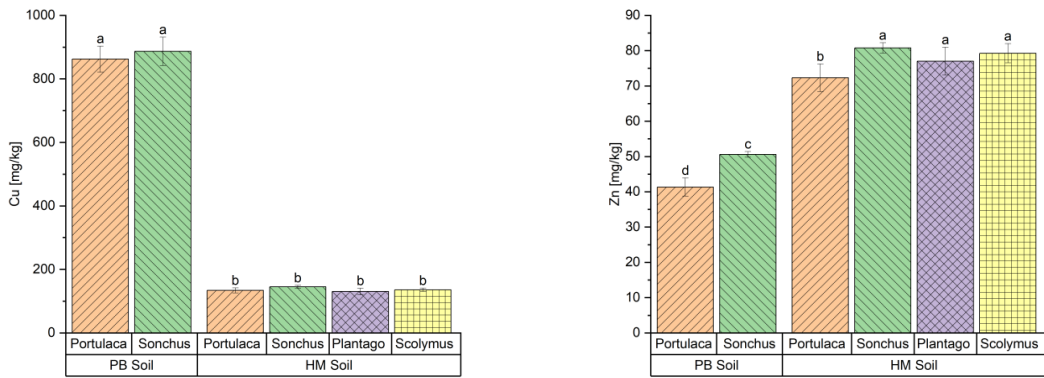


Abbildung 10: Gesamt- (A) und verfügbarer (B) Gehalt an Eisen (Fe) und Mangan (Mn) in PB- und HM-Böden und deren Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C)

A



B



C

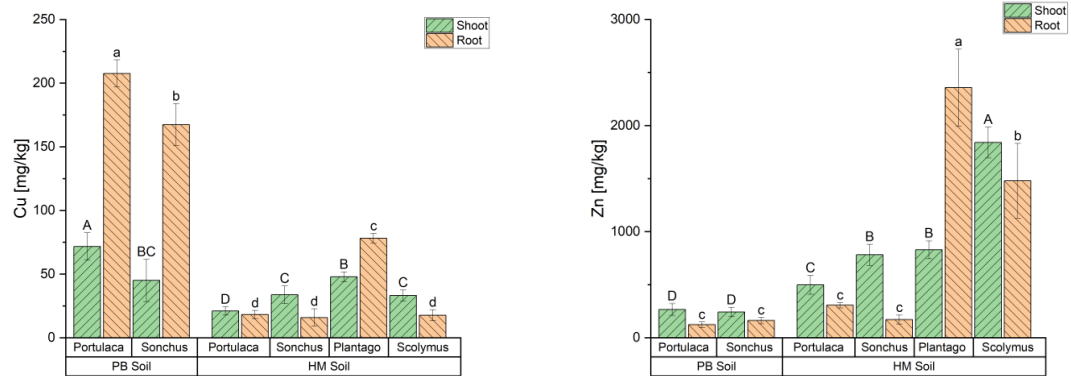
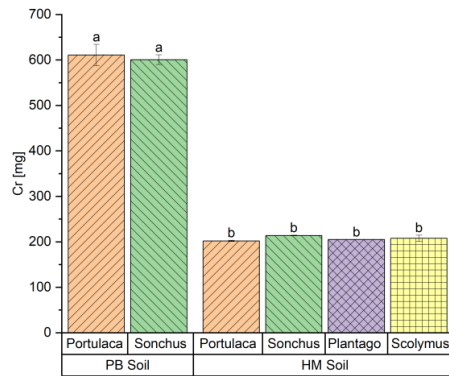
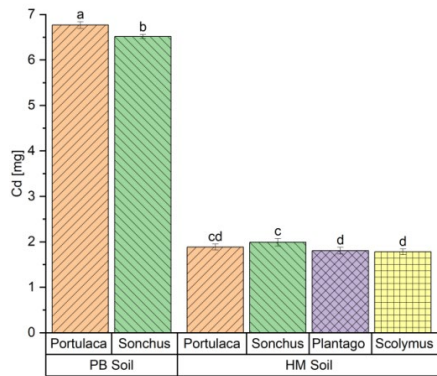
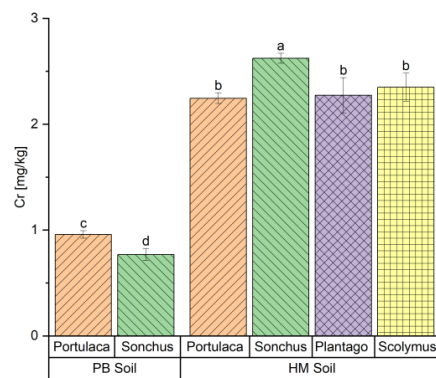
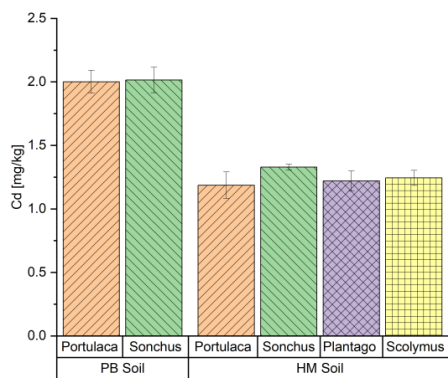


Abbildung 11: Gesamt- (A) und verfügbarer (B) Gehalt an Kupfer (Cu) und Zink (Zn) in PB- und HM-Böden sowie deren Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C)

A



B



C

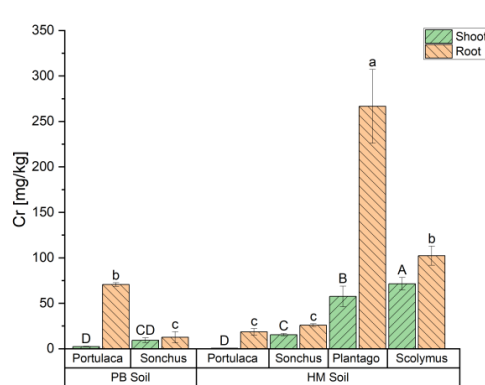
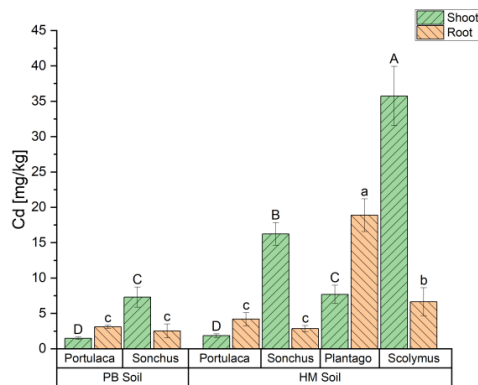
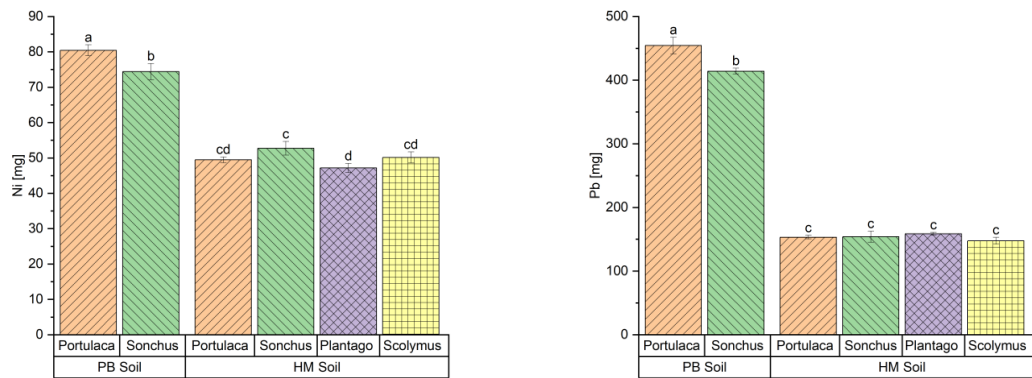
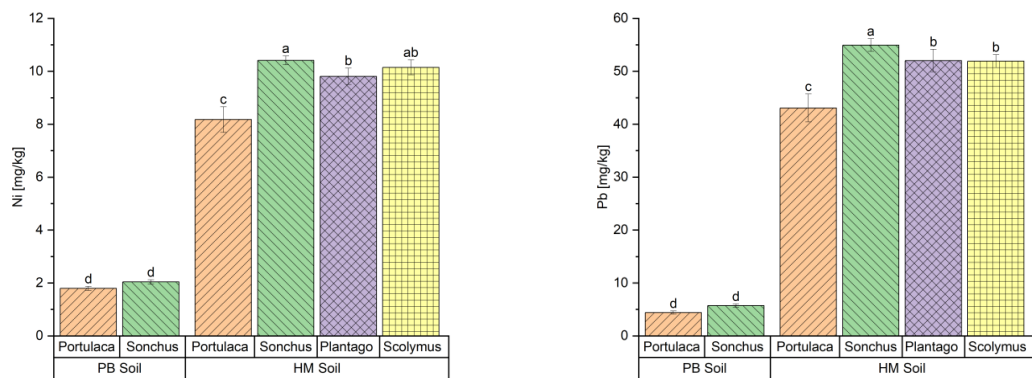


Abbildung 12: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) von Cadmium (Cd) und Chrom (Cr) in PB- und HM-Böden sowie deren Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C)

A



B



C

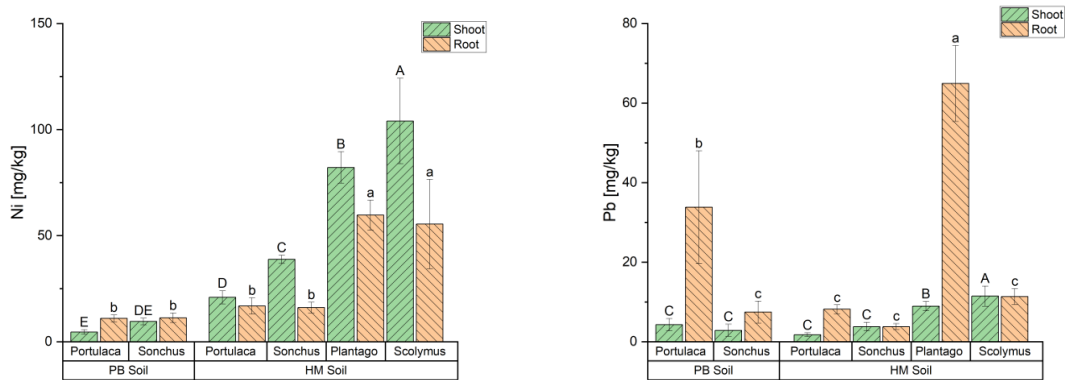


Abbildung 13: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) von Nickel (Ni) in PB- und HM-Boden und sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C)

Aufgaben 3.4

WEPs und Bodenfruchtbarkeit (Charakterisierung der mikrobiellen Gemeinschaft)

1. Bisher erzielte Ergebnisse

Die Proben der Rhizosphäre aus dem Topf-Experiment (Aufgaben 3.2) wurden gesammelt, behandelt und mittels Analyse von Phospholipidfettsäuren (PLFA) zur Charakterisierung der mikrobiellen Gemeinschaft verwendet. Der Gesamtgehalt an PLFA korreliert mit der mikrobiellen Biomasse und einzelne PLFA können als Biomarker für ökologische Gruppen wie Firmicutes, Gram-negative Bakterien (GNB), Actinobakterien und Pilze verwendet werden.

1.1 Gesamtgehalt PLFA

Der Gesamtgehalt der PLFA (die mit der mikrobiellen Biomasse korreliert) war generell am höchsten in der Rhizosphäre von Crithmum-Pflanzen in den sechs Böden (Abb. 14), während die Rhizosphäre der Sonchus-Pflanzen tendenziell den niedrigsten Gesamtgehalt an PLFA aufwies.

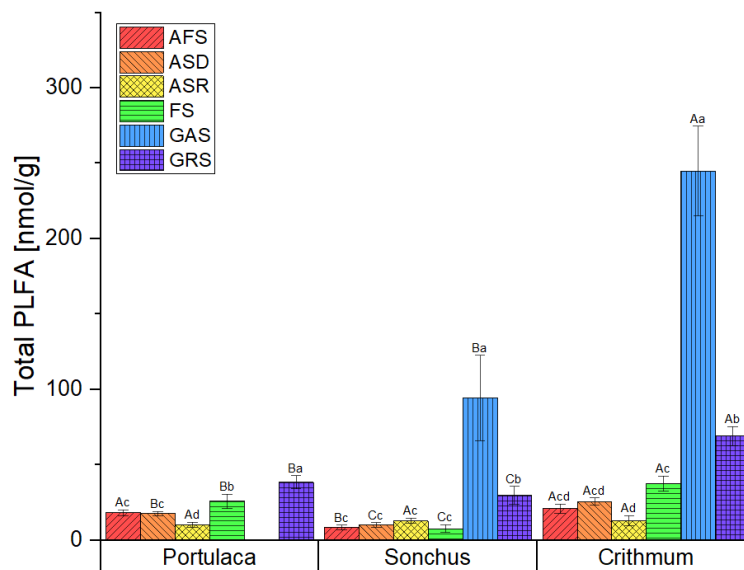


Abbildung 14: Gesamtgehalt der Phospholipidfettsäuren in der Rhizosphäre von *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum*, die in den sechs Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS – Waldboden, GAS - Gartenerde/organisches Material, GRS - Grünlandboden) während des Topfversuchs gewachsen sind. Bitte beachten: Große Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den drei Pflanzen für denselben Boden, während kleine Buchstaben signifikante Unterschiede zwischen den sechs mit einer Pflanzenart angebauten Böden zeigen.

Einerseits könnten Crithmum-Pflanzen die mikrobielle Gemeinschaft positiv stimuliert und das mikrobielle Wachstum erhöht haben. Andererseits wuchsen die Crithmum-Pflanzen viel langsamer und das Wachstumsstadium war verzögert im Vergleich zu den Portulak- und Sonchus-Pflanzen, die zum Zeitpunkt der Ernte bereits reif waren bzw. blühten. Daher konkurrierten Portulak- und Sonchus-Pflanzen wahrscheinlich stärker mit den Mikroorganismen um Nährstoffe, wenn sie ein höheres Wachstumsstadium erreichten. Wir vermuten, dass sich diese Konkurrenz negativ auf die mikrobielle Biomasse ausgewirkt haben könnte. Generell wies das organische Material (GAS) den höchsten Gesamtgehalt an PLFA auf, was wir mit der Textur erklären würden, die viel Pflanzenmaterial und verfügbares organisches Substrat für den mikrobiellen Stoffwechsel enthielt. Der Grünlandboden (GRS) wies den zweithöchsten Gesamtgehalt an PLFA in der Rhizosphäre der drei Pflanzen auf und zeigte eine signifikante Tendenz für die Pflanzenarten (Crithmum > Portulak > Sonchus). Die gleiche signifikante Tendenz fanden wir für die Pflanzenarten im Waldboden (FS) und im Ackerboden aus Rostock (ASR). FS wies für Crithmum- und Portulak-Pflanzen den dritthöchsten Gesamtgehalt an PLFA auf, während der Gesamtgehalt an PLFA sich in der Rhizosphäre von Sonchus-Pflanzen nicht signifikant von den Ackerböden und dem künstlichen Boden unterschied. Die Gesamtmenge der PLFA im künstlichen Boden (AFS) war höher, wenn dieser mit Crithmum- oder Portulak-Pflanzen angebaut wurde, aber niedriger unter Sonchus-Pflanzen.

Der Gesamtgehalt der PLFA folgte dem Gehalt an Heißwasser extrahierbarem organischem Kohlenstoff und Stickstoff für GAS und GRS, nicht aber für die anderen Böden. Wir vermuten, dass Pflanzen und

Mikroben im AFS, ASD, ASR und FS stärker um Bodennährstoffe konkurrieren als im GAS oder GRS. Die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben sind in den verschiedenen Böden je nach verfügbaren Nährstoffen vermutlich unterschiedlich, was auf die Wachstumsbegrenzung der Pflanzen und Mikroorganismen durch den am meisten benötigten Nährstoff zurückzuführen ist.

1.2. Relative Häufigkeit einzelner PLFA

Darüber hinaus überprüften wir, ob die durch die relative Häufigkeit einzelnen PLFA ein Profil für die verschiedenen Böden oder Pflanzenarten ergab (Abb. 14; Abb. S22-S27). Tabelle S3 fasst Biomarker-Fettsäuren zu ökologischen Gruppen (GNB – Gram-negative Bakterien, Firmicutes, Actinobacteria, Fungi; GPB – Gram-positive Bakterien, Bakterien) zusammen.

Wir fanden heraus, dass die Pilz-Biomarker-Fettsäure 18:2n6,9c eine signifikant höhere relative Häufigkeit in der Rhizosphäre von Crithmum-Pflanzen in den sechs Böden aufwies als bei Portulak- oder Sonchus-Pflanzen. Die relative Häufigkeit einer anderen Pilz-Biomarker-Fettsäure (18:1n9c) war zumindest in der Rhizosphäre von Crithmum-Pflanzen, die in AFS, ASR und FS angebaut wurden, höher als in der Rhizosphäre von Portulak- oder Sonchus-Pflanzen. In FS wiesen die Pilz-Biomarker-Fettsäuren signifikant höhere Abundanzen in der Rhizosphäre von Crithmum-Pflanzen auf, während die Häufigkeiten der Biomarker-Fettsäuren für Actinobacteria, Firmicutes sowie viele Biomarker-Fettsäuren für GNB im Vergleich zur Rhizosphäre von Portulak- oder Sonchus-Pflanzen signifikant niedriger waren. Wir vermuten eine stärkere Wechselwirkung der Pilze mit Crithmum-Pflanzen in der Rhizosphäre als mit Portulak- oder Sonchus-Pflanzen. Der niedrige pH-Wert im Waldboden (FS) könnte das Pilzwachstum stimuliert haben, während die Bedingungen eher nachteilig für Actinobakterien, Firmicutes und GNB waren. Die höchste relative Häufigkeit von 16:1n5c, einem Biomarker für arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF), wurde in AFS und GAS gefunden, möglicherweise aufgrund des hohen Anteils an organischem Kohlenstoff. Methylverzweigte Fettsäuren (z. B. 10me16:0 und 10me18:0) wiesen die höchste relative Häufigkeit in ASD und FS auf und sind Biomarker für Actinobakterien. Die geringste relative Häufigkeit dieser Biomarker wurde im AFS und im GAS festgestellt, welche künstlich hergestellte Bodenmaterialien ohne pedogene Entwicklung sind, sodass die langsam wachsenden Actinobakterien wahrscheinlich noch nicht vollständig etabliert waren. Die Cyclopropyl-Fettsäuren (cy17:0 und cy19:0) waren häufiger in den Böden mit Portulak- oder Sonchus-Pflanzen vorzufinden. Insbesondere AFS, GAS und GRS wiesen die höchsten relativen Häufigkeiten dieser Fettsäuren in der Rhizosphäre der drei Pflanzen auf. Die höchste relative Häufigkeit der endständig verzweigten Fettsäuren (z. B. i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0 und a17:0), die Biomarker für Firmicutes sind, wurde im GRS gefunden. FS und ASR wiesen die höchste Abundanz an unspezifischen Fettsäuren auf, insbesondere an Palmitinsäure (16:0).

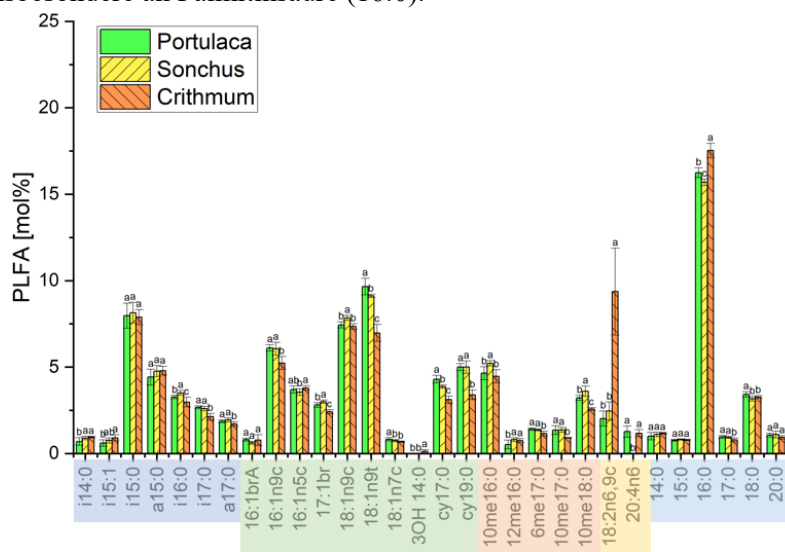


Abbildung 14: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für Ackerboden aus Düsseldorf (ASD), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

1.3. PLFA ratios

Die Kalkulation des Verhältnisses der Fettsäure-Biomarker von Pilzen zu Bakterien (F/B ratio) sowie von Gram-negativen Bakterien zu Gram-positiven Bakterien (GNB/GPB ratio) wurde durchgeführt. Crithmum-Pflanzen zeigten ein deutlich erhöhtes Pilz-Bakterien Verhältnis bei den sechs Böden im Vergleich zu Sonchus- und Portulak-Pflanzen (Abbildung 15). Beim Waldboden (FS) unter Crithmum-Pflanzen war das Pilz-Bakterien Verhältnis am höchsten, wobei die Replikate jedoch eine hohe Standardabweichung zeigten. Unter Sonchus-Pflanzen zeigte die Gartenerde (GAS) das höchste Pilz-Bakterien Verhältnis, während sich das höchste Pilz-Bakterien Verhältnis unter Portulak-Pflanzen beim künstlichen Boden (AFS) und beim Ackerboden aus Düsseldorf (ASD) ergab. Das GNB-GPB Verhältnis war für die Ackerböden (ASD, ASR), die Gartenerde (GAS) und den Grünlandboden (GRS) unter allen Pflanzen nahe bei 1, während es im künstlichen Boden (AFS) und im Waldboden (FS) unter allen Pflanzen deutliche Veränderungen zeigte (Abb. 16). Im AFS war das GNB-GPB Verhältnis unter allen Pflanzen erhöht (> 1), d.h. es wurden mehr PLFA-Biomarker für Gram-negative Bakterien im Vergleich zu Gram-positiven Bakterien gemessen. Im FS war das GNB-GPB Verhältnis unter Crithmum-Pflanzen erhöht (> 1), während es unter Portulak- und Sonchus-Pflanzen deutlich < 1 lag.

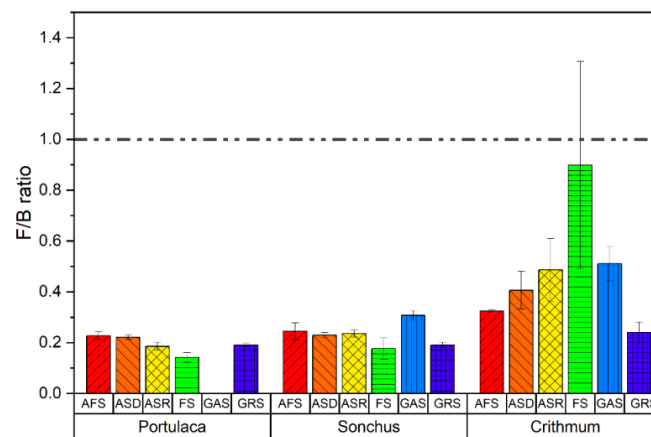


Abbildung 15: Verhältnis der Fettsäure-Biomarker von Pilzen (F) zu Bakterien (B) in den mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzen Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS – Waldboden, GAS - Gartenerde/organisches Material, GRS - Grünlandboden).

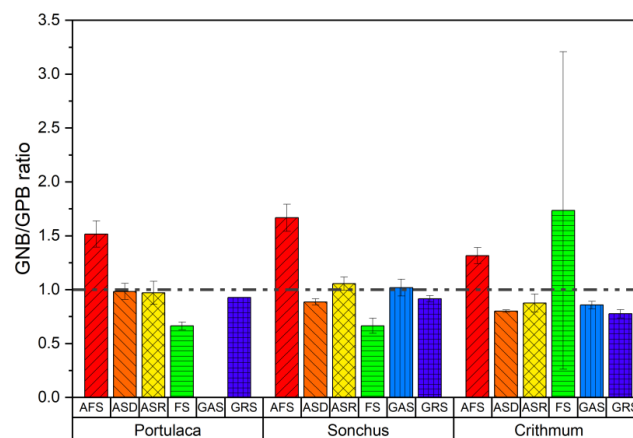


Abbildung 16: Verhältnis der Fettsäure-Biomarker von gram-negativen Bakterien (GNB) zu gram-positiven Bakterien (GPB) in den mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzen Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS – Waldboden, GAS - Gartenerde/organisches Material, GRS - Grünlandboden).

1.4. Statistische Auswertung

Die nicht-metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) in Abbildung 17 zeigt die Verteilung der sechs Böden mit unterschiedlicher Bepflanzung bezogen auf die Biomarker-Fettsäuren für ökologische Gruppen (aus Tab. S3). Die Böden GAS und FS liegen dabei am weitesten auseinander (Abb. 17) und werden durch NMDS1 bestimmt. Da die mikrobielle Gemeinschaft Kohlenstoff abbaut, kann der Kohlenstoffgehalt eines Bodens großen Einfluss auf deren Zusammensetzung haben. GAS wies einen Kohlenstoffgehalt von ca. 20 % auf, während in FS nur ein Kohlenstoffgehalt von 0.8 % nachweisbar war. Die Böden AFS und GRS zeigen für alle drei Pflanzen eine enge Gruppierung und Abgrenzung zu den anderen Böden. Die Böden ASD und ASR sind nicht so deutlich voneinander abgegrenzt und zeigen stattdessen eine deutlichere Abgrenzung zwischen Portulak-/Sonchus-Pflanzen und Crithmum-Pflanzen. Generell sind die mit *Crithmum maritimum* bepflanzten Böden ASD, ASR, GAS und FS deutlich von den Bepflanzungen mit *Portulaca oleracea* und *Sonchus oleraceus* abgegrenzt. Beim Boden GRS ist diese Abgrenzung nicht so deutlich zu erkennen. Die Pflanzenarten werden auf Achse NMDS 2 separiert, außer für GRS und AFS. Abgesehen von AFS und GRS, scheinen Crithmum-Pflanzen also einen deutlichen Einfluss auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft zu haben. Dies kann auf die signifikant erhöhte Abundanz von Pilz-Biomarkern, wie in 1.2. und 1.3. bereits beschrieben, zurück zu führen sein.

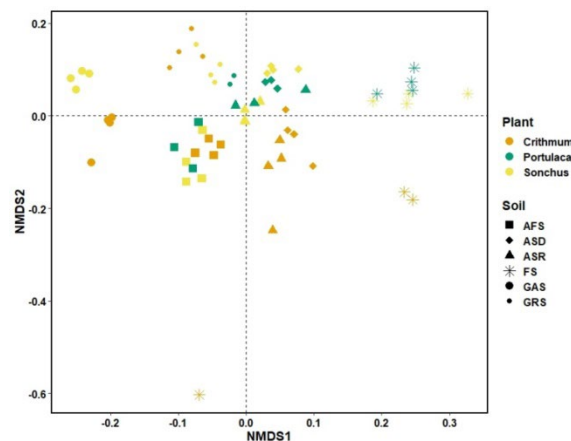


Abbildung 17: Nicht-metrische multidimensionale Skalierung (NMDS; Stress: 0.1367871) der Phospholipidfettsäuren als Biomarker für ökologische Gruppen (GNB, Firmicutes, Actinobacteria, Fungi, general) in den mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzten Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS – Waldboden, GAS - Gartenerde/organisches Material, GRS - Grünlandboden).

Durch eine Hauptkomponentenanalyse der PLFA-Daten für die einzelnen Pflanzen auf den sechs Böden wollten wir den Einfluss der Böden auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft weiter ergründen (Abb. 18). Unter Portulak-Pflanzen waren AFS und FS auf der Hauptkomponente 1 separiert und GRS und ASR auf der Hauptkomponente 2. AFS war mit den Fettsäure-Biomarkern für Pilze und GNB assoziiert, FS mit den Fettsäure-Biomarkern für Actinobakterien, ASR mit den unspezifischen Fettsäure-Biomarkern und GRS mit den Fettsäure-Biomarkern für Bakterien. Unter Sonchus-Pflanzen waren GAS und FS auf der Hauptkomponente 1 separiert und GRS und AFS auf der Hauptkomponente 2. GAS war mit den Fettsäure-Biomarkern für Bakterien und Pilze assoziiert, FS mit den Fettsäure-Biomarkern für Actinobakterien, GRS mit den Fettsäure-Biomarkern für Firmicutes und AFS mit den Fettsäure-Biomarkern für GNB. Unter Crithmum-Pflanzen waren GAS und AFS zusammen gruppiert und mit GNB assoziiert, während FS mit den unspezifischen Fettsäure-Biomarkern und GRS mit den Bakterien assoziiert waren. Unter Sonchus- und Portulak-Pflanzen zeigte ASD eine ausgeglichene Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft; unter Crithmum-Pflanzen zeigten dies ASR und ASD. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Ackerböden eine recht diverse Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft aufweisen bzw. dies durch die angebauten WEPs gefördert wurde. GRS ist unter allen Pflanzen mit den Bakterien bzw. Firmicutes assoziiert, was ein niedriges C:N Verhältnis begünstigen könnte. Dadurch wäre mehr organischer Stickstoff verfügbar, der das Pflanzenwachstum gezielt unterstützen kann.

Wir haben also die Variabilität der mikrobiellen Gemeinschaften in einer Reihe von sechs Böden mit unterschiedlicher Verfügbarkeit von Nährstoffen und Spurenelementen aufgezeigt. Unsere Ergebnisse deuten auf komplexe Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben hin, die wahrscheinlich durch unterschiedliche Bodentexturen, Nährstoffgehalte und pH-Werte in den sechs Böden beeinflusst werden. Darüber hinaus möchten wir hervorheben, dass auch die Pflanzenart einen Einfluss auf die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden hatte, da sich die PLFA-Profile in der Rhizosphäre von Portulak-, Sonchus- oder Crithmum-Pflanzen im selben Boden veränderten. Es lassen sich die Annahmen der PLFA-Analyse daher wie folgt zusammenfassen: 1) *Crithmum maritimum* ist stark mit Pilzen assoziiert, 2) das Wachstumsstadium (Crithmum-Pflanzen waren in der Reife hinter Sonchus- und Portulak-Pflanzen zurück) steuert potentiell die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft, und 3) Böden enthalten ihre autochthone mikrobielle Gemeinschaft, aber WEPs sind in der Lage, diese durch Exsudate und Konkurrenz um Nährstoffe zu beeinflussen. Eine diverse mikrobielle Gemeinschaft ist essentiell für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit.

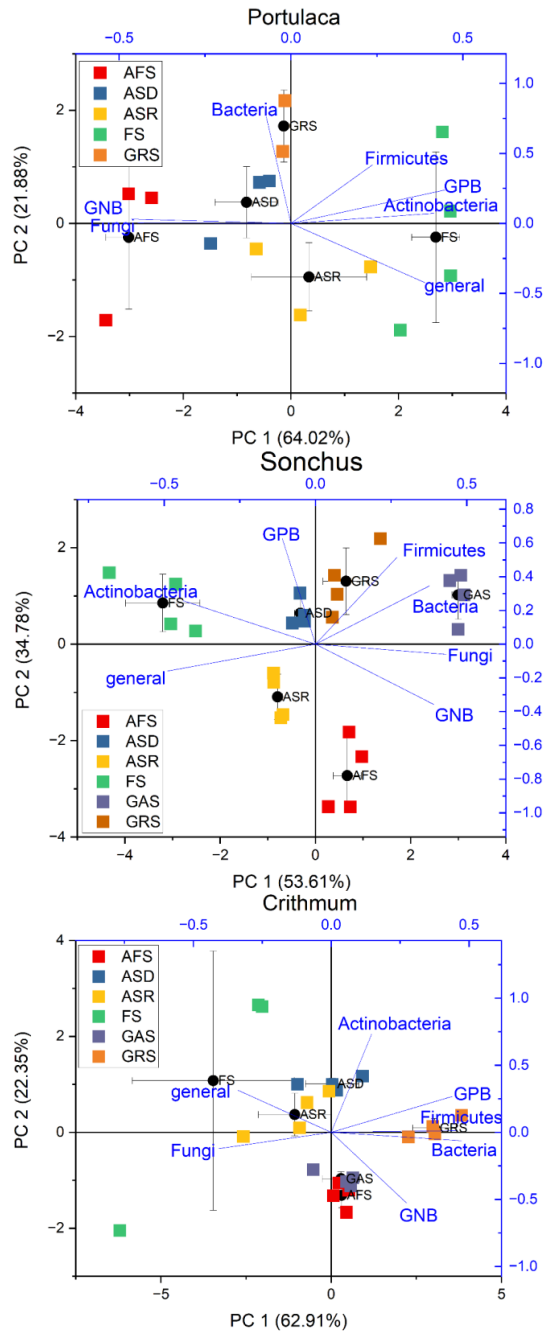


Abbildung 18: Hauptkomponentenanalyse (PCA) der Phospholipidfettsäuren als Biomarker für ökologische Gruppen in den mit *Portulaca oleracea* (A), *Sonchus oleraceus* (B) und *Crithmum maritimum* (C) bepflanzen Böden (AFS - künstlicher Boden, ASD - Ackerboden aus Düsseldorf, ASR - Ackerboden aus Rostock, FS – Waldboden, GAS - Gartenerde/organisches Material, GRS - Grünlandboden).

Literaturliste

- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV neue Fassung, (2021))
<https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-bodenschutz-und-altlastenverordnung-bbodschv>
 Jones, J., Wolf, J.B., Mills, H.A., 1991. *Plant Analysis Handbook: A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*. Athens, USA.
 Soltanpour, P.N., Schwab, A.P., 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 8, 195-207.
 Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, and M.E. Sumner. 1996. *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Part 3*. ASA and SSSA, Madison, WI

Ergänzende Materialien (Anhang A)

**Bericht zum Verbundprojekt: Aufwertung mediterraner landwirtschaftlicher Kleinbetriebe durch
den Anbau bislang ungenutzter Wildpflanzen (VALUEFARM)**

Förderkennzeichen: 01DH20006

Tabelle S1: Gesamtkonzentration der Spurenelemente in den Böden der Topfversuche

Bodenbezeichnung	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	V	Zn
	-----mg/kg-----											
Ackerboden Düsseldorf (arable soil D)	14945.5	0.7	7.4	35.1	17.5	19411.8	1534.1	19.2	76.2	2.0	44.4	107.1
Ackerboden Rostock (arable soil R)	11533.7	0.1	4.4	22.6	6.8	13349.4	205.8	9.0	15.4	LDL	23.8	23.7
Waldboden (Forest soil)	2975.7	0.1	1.4	10.5	6.2	6255.8	173.0	3.4	21.8	LDL	7.4	10.6
Grünlandboden (Grassland soil)	43685.1	0.1	11.9	51.6	15.2	38930.1	330.2	34.8	39.1	3.9	58.6	72.3
Künstlicher Boden (artificial soil)	1804.3	LDL	0.3	2.9	11.2	2270.4	26.1	1.3	53.9	LDL	1.7	LDL
Gartenerde (Garden soil)	3118.5	0.3	1.3	6.8	12.6	3369.9	144.1	3.8	23.4	LDL	6.2	59.6

LDL= unterhalb des Messgrenze; nd: nicht gemessen

Tabelle S2: Chemische Eigenschaften der in den Topfversuchen verwendeten Böden

Soil properties	Pescher Busch (PB) soil Highly contaminated soil	Hasenmühle (HM) soil Moderately contaminated soil
pH (CaCl ₂)	6.41	6.14
pH (water)	7.05	6.61
Sand, %	6.0	29.0
Silt, %	92.0	62.0
Clay, %	2.0	9.0
Total Carbon, %	7.1	5.1
Cation Exchange Capacity	15.1	14.4
Fe _d , %	3.51	1.66
Mn _d , %	0.091	0.068

Tabelle S3: Ökologische Gruppen bestimmt nach Biomarker-Fettsäuren

Gruppen	Biomarker-Fettsäuren
GNB	16:1 ω 9c; 16:1; 17:1; 18:1 ω 7c, 18:1 ω 9t; cy17:0; cy19:0; 3OH 14:0
Firmicutes	i14:0; a15:0; i15:0; i16:0; a17:0; i17:0
Actinobacteria	10Me16:0; 10Me17:0; 10Me18:0
Fungi	16:1 ω 5c; 18:1 ω 9c; 18:2 ω 6,9c
GPB	Firmicutes + Actinobacteria
Bakterien	GNB + GPB
General (unspezifisch)	14:0; 15:0; 16:0; 17:0; 18:0; 20:0; i15:1; 6Me17:0; 12Me16:0; 20:4 ω 6



Abbildung S1: Topfversuch im Gewächshaus mit *Portulaca oleracea* (Saatgut unterschiedlich gut keimfähig; O – hohe Keimrate, P- niedrige Keimrate), *Sonchus oleracea* (S) und *Chrithmum maritimum* (C)

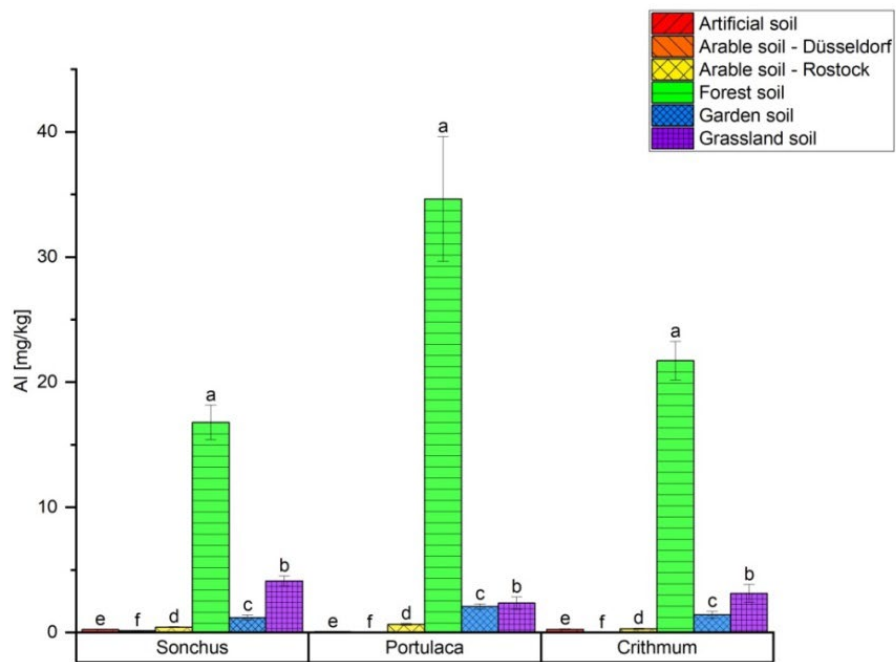


Abbildung S2: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Al in den untersuchten Böden

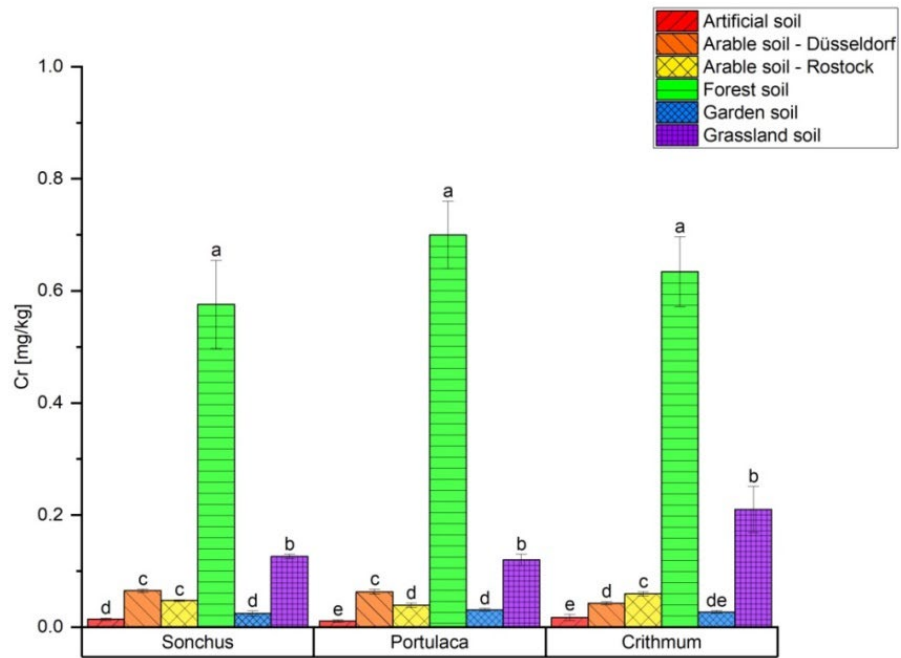


Abbildung S3: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Cr in den untersuchten Böden

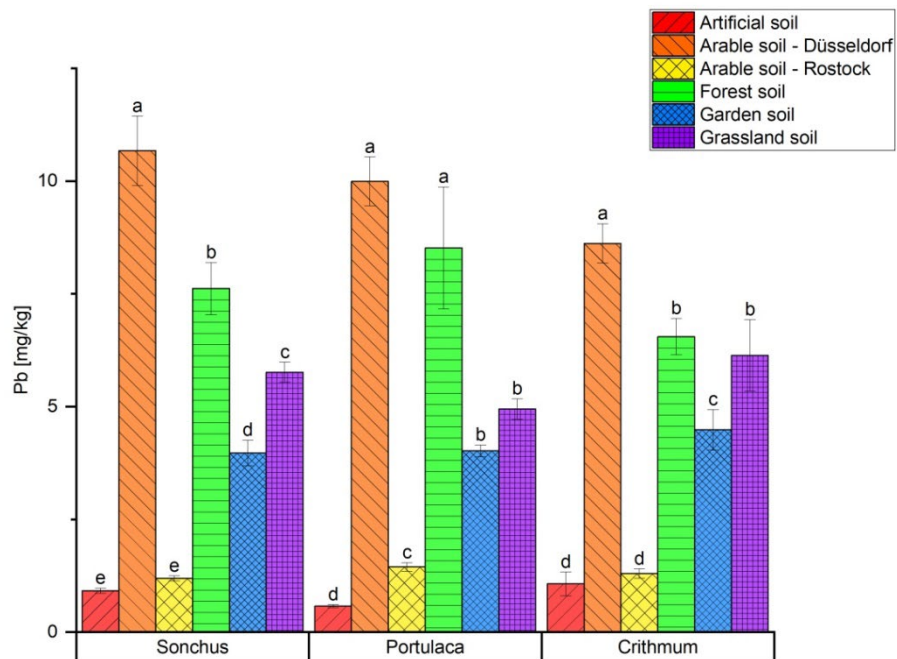


Abbildung S4: Auswirkungen der Pflanzenart auf die Verfügbarkeit von Pb in den untersuchten Böden



Abbildung S5: Fotos der griechischen (*Portulaca oleracea*) und einheimischen wilden Portulak-Pflanzen (nicht bestimmt) auf dem Feld (Fotos: Sabry Shaheen).



Portulaca grown in PB (PW1) and HM (PW3) soils

Abbildung S6: Growth of portulaca in the studied soils (Fotos: Robin Vieler)



Sonchus grown in **PB** (SW1) and **HM** (SW3) soils

Abbildung S7: Growth of sonchus in the studied soils (Fotos: Robin Vieler)



Plantago grown in **HM** soil

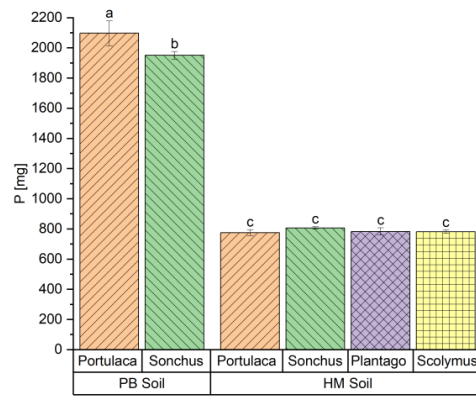
Abbildung S8: Growth of plantago in the studied soils (Fotos: Robin Vieler)



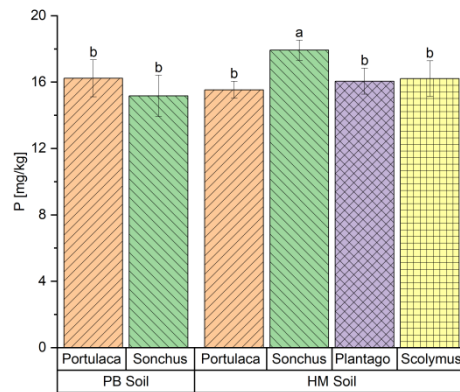
Scolymus grown in HM soil

Abbildung S9: Growth of scolymus in the studied soils (Fotos: Robin Vieler)

A



B



C

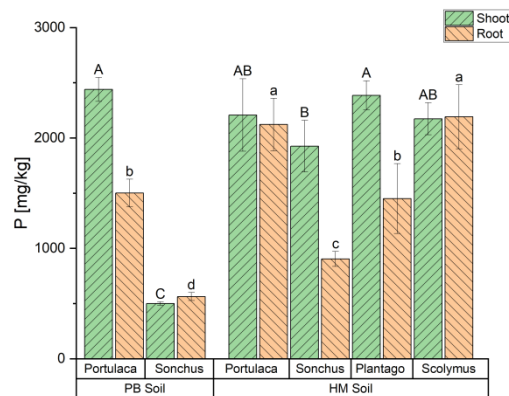
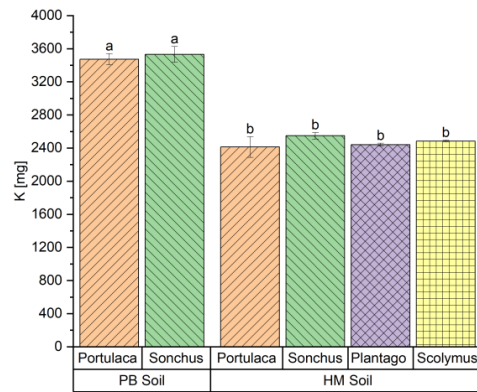
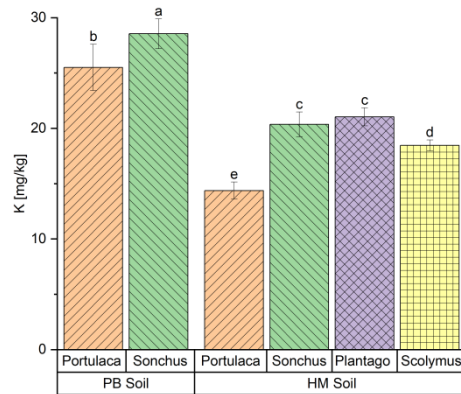


Abbildung S10: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Phosphor (P) in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



B



C

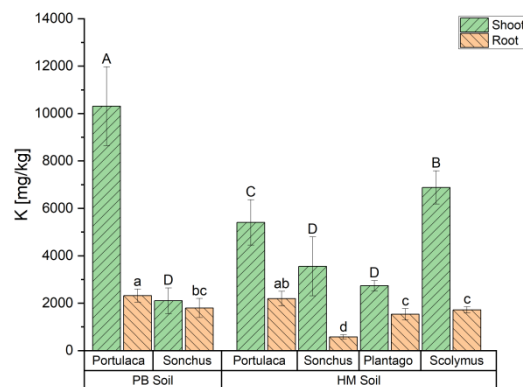
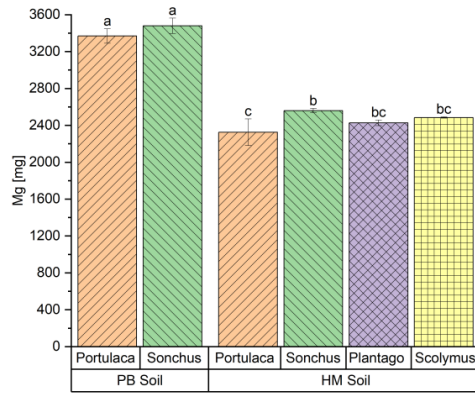
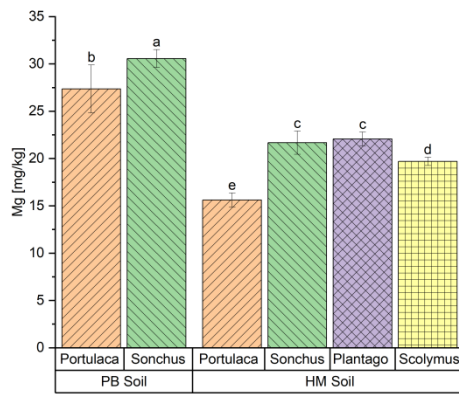


Abbildung S11: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an K in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



B



C

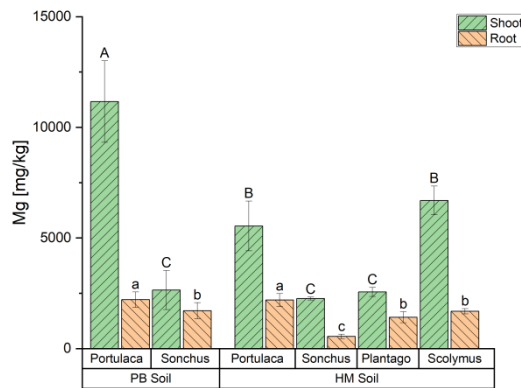
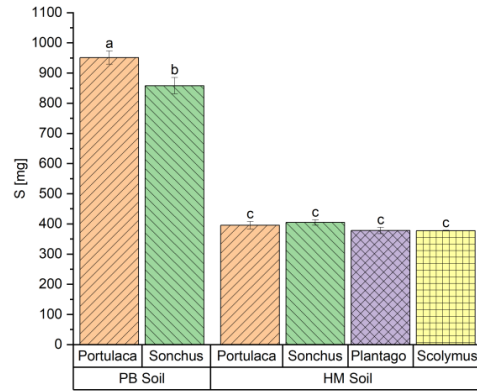
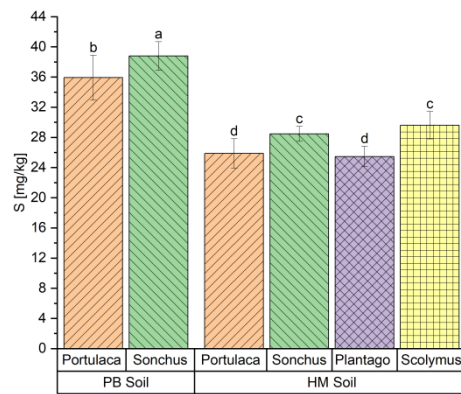


Abbildung S12: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Mg in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



B



C

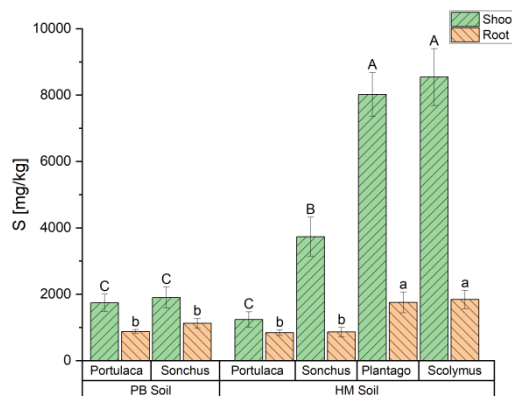
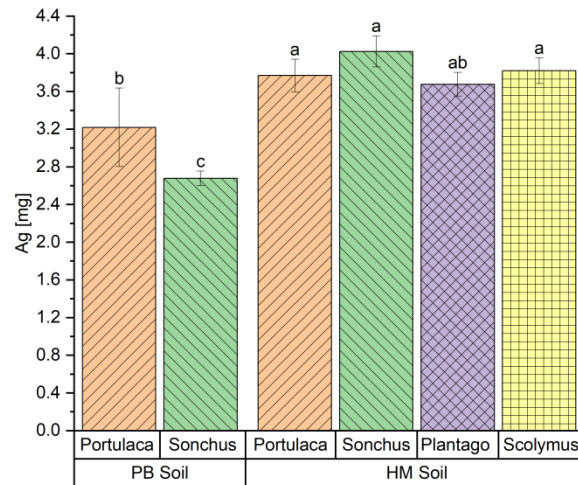


Abbildung S13: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an S in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

(A)



(B)

Ag available content in both soils was below detection limits

(C)

Ag content in plants was below detection limits

Abbildung S14: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Ag in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

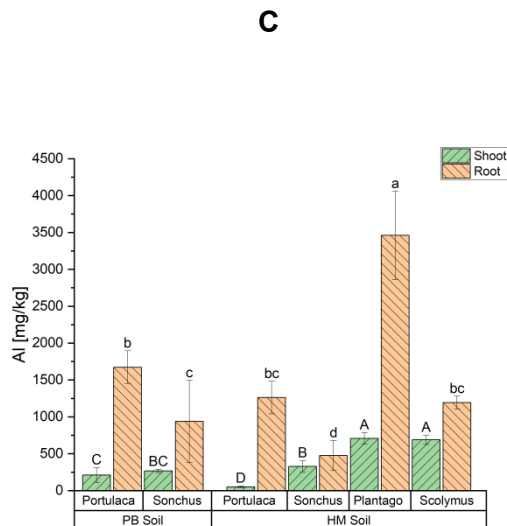
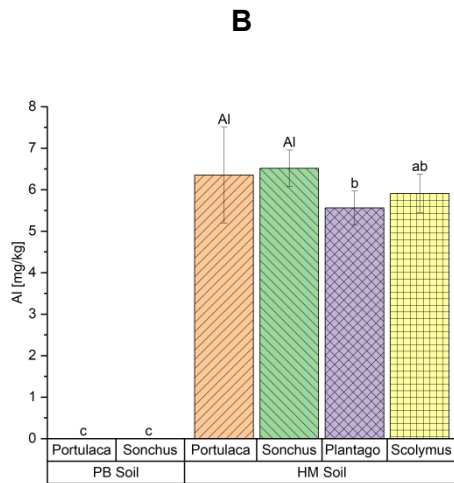
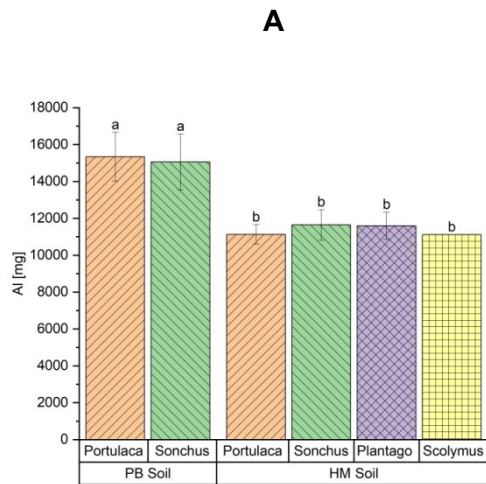
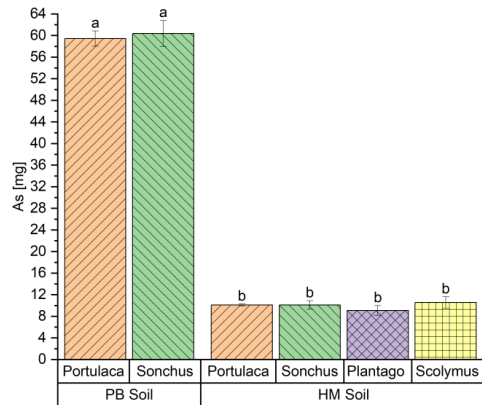
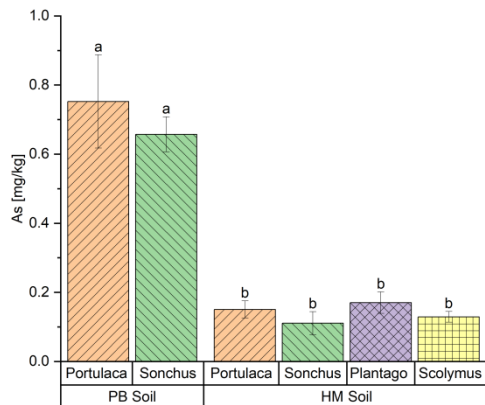


Abbildung S15: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Al in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

(A)



(B)

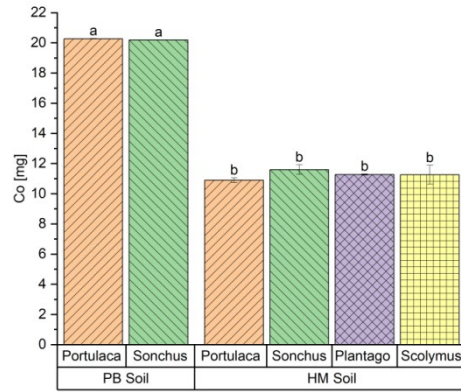


(C)

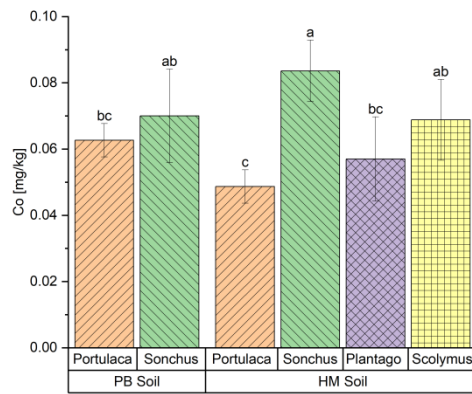
As content in plants was below detection limits

Abbildung S16: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an As in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



B



C

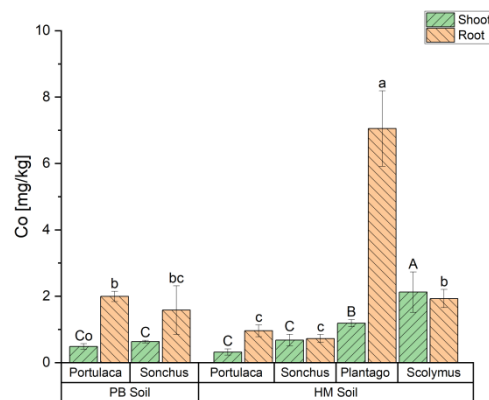
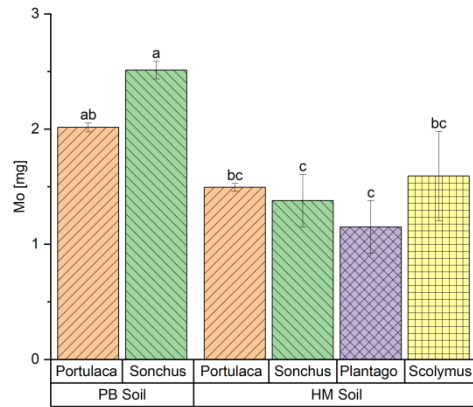


Abbildung S17: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Co in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



(B)

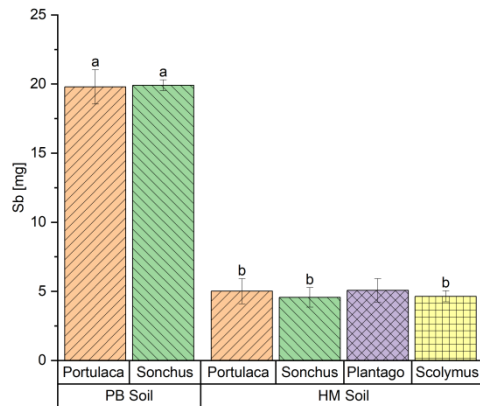
Mo available content in both soils was below detection limits

(C)

Mo content in plants was below detection limits

Abbildung S18: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Co in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



(B)

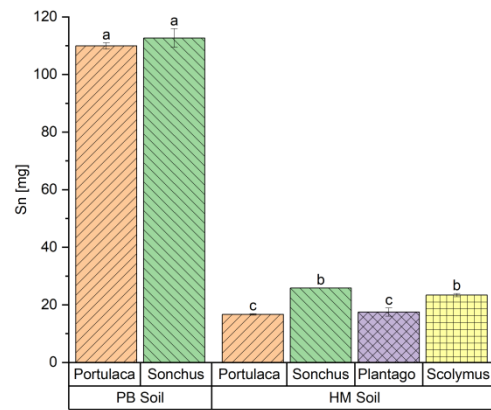
Sb available content in both soils was below detection limits

(C)

Sb content in plants was below detection limits

Abbildung S19: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Sb in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



(B)

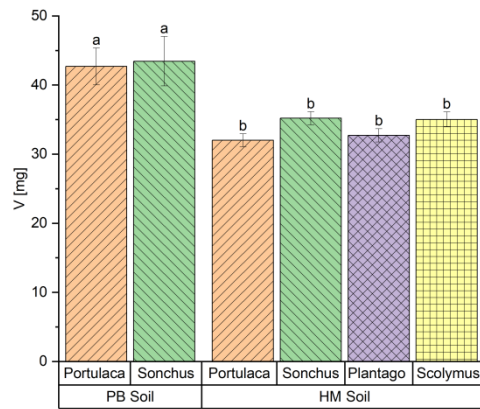
Sn available content in both soils was below detection limits

(C)

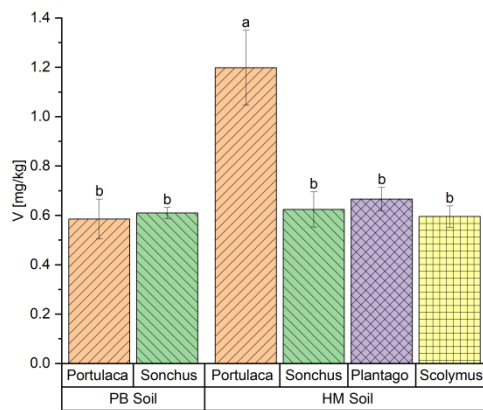
Sn content in plants was below detection limits

Abbildung S20: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an Sn in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

A



B



(C)

Mo content in plants was below detection limits

Abbildung S21: Gesamtgehalt (A) und verfügbarer Gehalt (B) an V in PB- und HM-Böden sowie sein Gehalt in den Wurzeln und Sprossen der untersuchten Pflanzen (C).

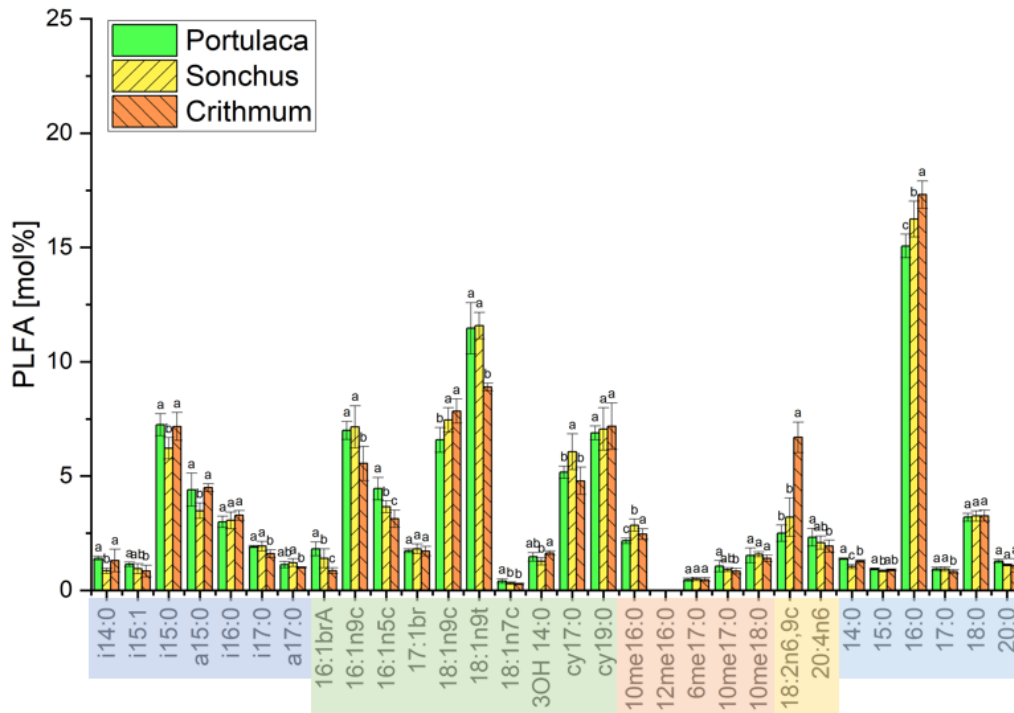


Abbildung S22: Phospholipid-Fettsäure-Charakterisierung für künstlichen Boden (AFS), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

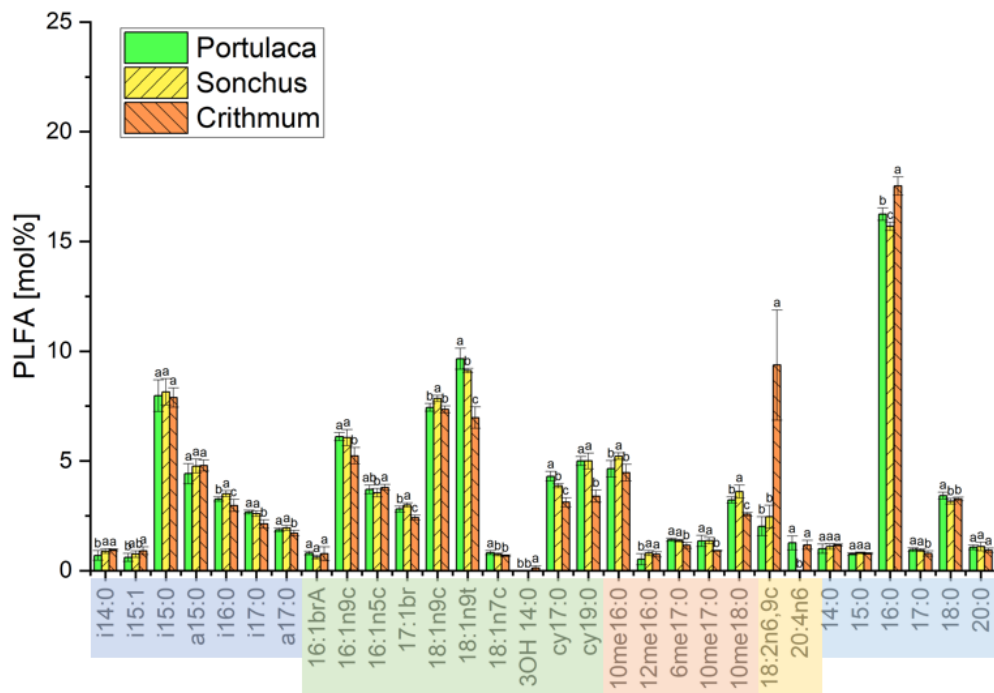


Abbildung S23: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für Ackerboden aus Düsseldorf (ASD), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

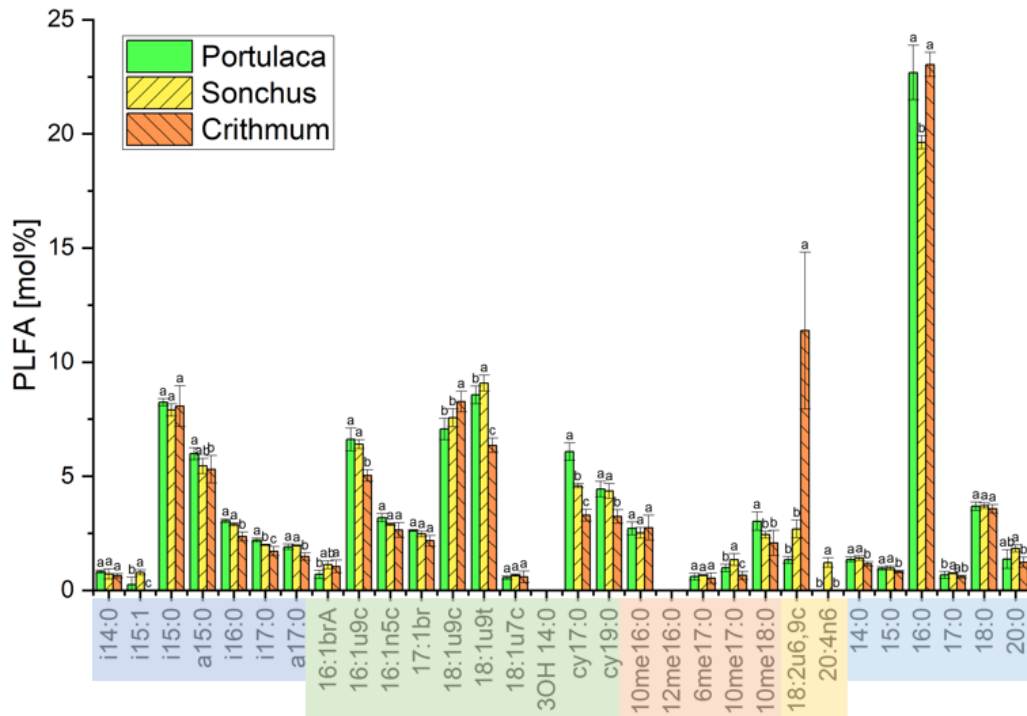


Abbildung S24: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für Ackerboden aus Rostock (ASR), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

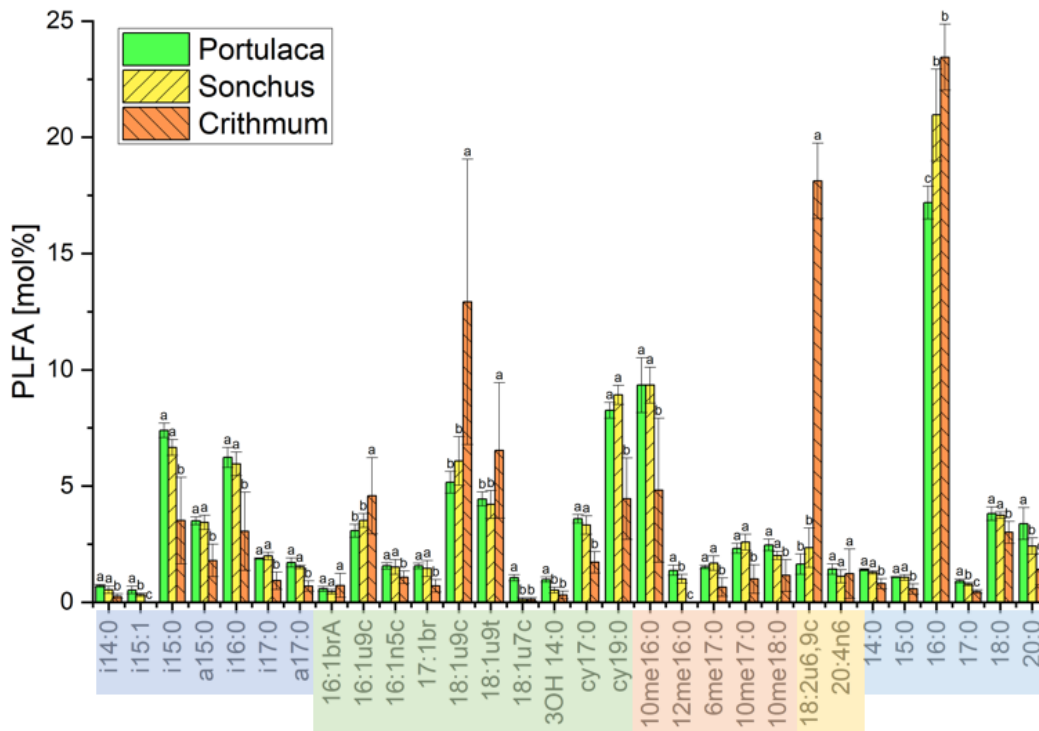


Abbildung S25: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für Waldboden (FS), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

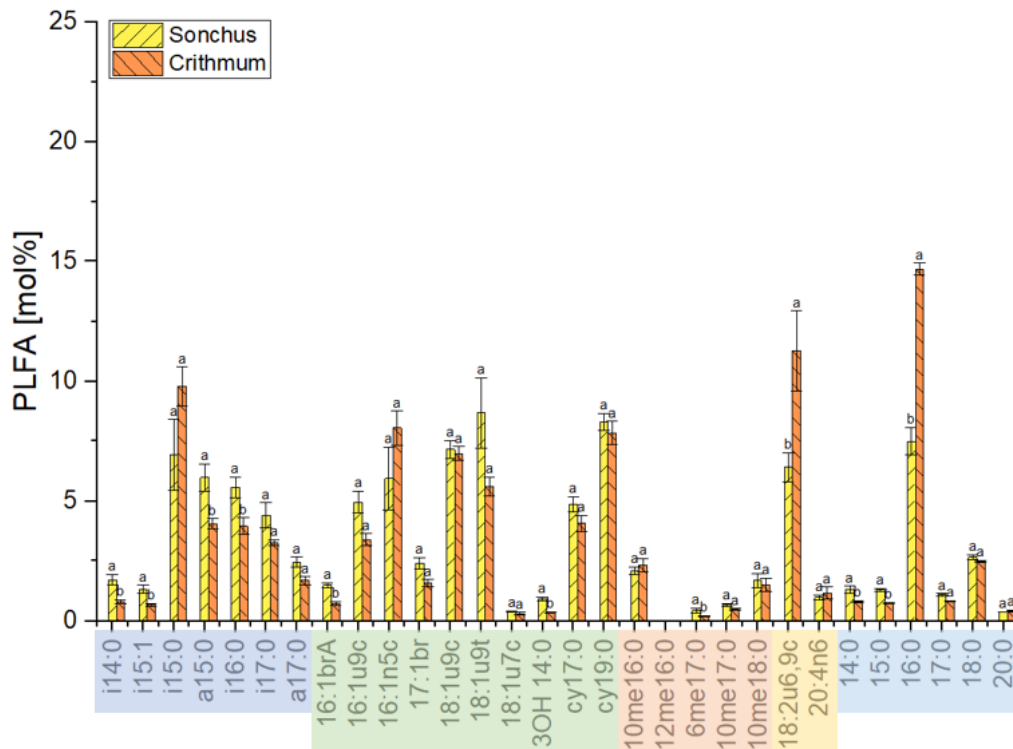


Abbildung S26: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für organisches Material (GAS), welches mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.

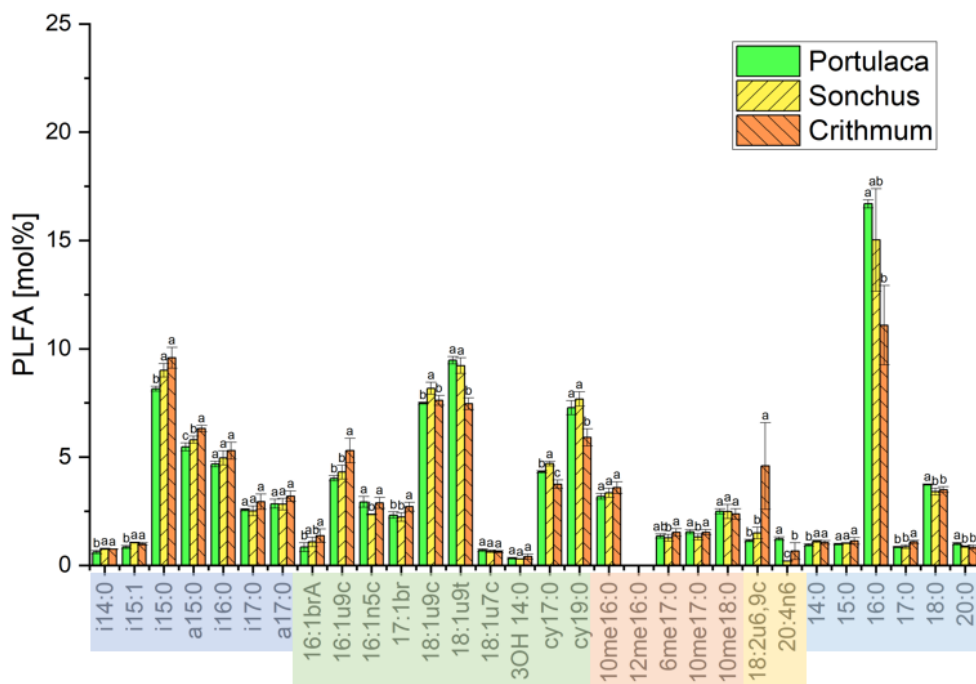


Abbildung S27: Charakterisierung der Phospholipidfettsäuren für Grünland-Boden (GRS), der mit *Portulaca oleracea*, *Sonchus oleraceus* oder *Crithmum maritimum* bepflanzt wurde.