



Zwischenfrüchte im Ackerbau

Auswirkungen auf Bodenstruktur,
Nährstoff- und Wasserhaushalt,
Mikrobiom, Erträge und Rentabilität

Prof. Dr. Barbara Reinhold-Hurek¹, Dr. Thomas Hurek¹, Dr. Diana Heuermann², Prof. Dr. Nicolaus von Wirén², Dr. Norman Gentsch³, Prof. Dr. Georg Guggenberger³, Jonas Schön⁴, Prof. Dr. Peter Breunig⁴, Robin Kümmerer⁴, Sophia Breische⁵, Dr. Ulf Feuerstein⁵, Carmen Fiedler⁵, Jan Hendrik Schulz⁵, Dörte Schweneker⁵, Dr. Matthias Westerschulte⁵, Michał Oskiera¹

¹Universität Bremen, ²IPK Gatersleben, ³Leibniz Universität Hannover, ⁴Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, ⁵Deutsche Saatveredelung AG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das CATCHY-Konsortium:

Universität Bremen

Abteilung Molekulare Pflanzen-
Bakterien-Interaktionen



**Leibniz Universität
Hannover**

Institut für Bodenkunde



**Leibniz-Institut für
Pflanzengenetik und
Kulturpflanzenforschung
Gatersleben**

Forschungsgruppe Molekulare
Pflanzenernährung



**Hochschule
Weihenstephan-Triesdorf**

Biomasseinstitut Pflanzenbau,
Pflanzenschutz und Grünland



Biomasseinstitut Marketing,
Marktlehre

**Deutsche Saatveredelung
AG**

Abteilung Forschung
und Entwicklung



Abteilung Produktmanagement
Biodiversität

Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Böden sind unsere Lebensgrundlage und erfüllen für den Menschen und die Umwelt eine Reihe wichtiger Funktionen. Sie sind die zentrale Ressource für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie nachwachsender Rohstoffe für die Industrie und Energiegewinnung. Mit der Speicherung von Wasser und der Filterung von Schadstoffen tragen Böden zum Hochwasserschutz bei und sorgen für sauberes Trinkwasser. Sie sind der größte terrestrische Kohlenstoffspeicher der Erde und damit enorm wichtig für den Klimaschutz. Nicht zuletzt sind Böden Lebensraum für eine große Vielfalt von Organismen, die eine entscheidende Rolle für die Nährstoffversorgung der Pflanzen spielt. Der Boden ist eine nur sehr schwer erneuerbare Ressource. Daher sollte das Ziel jeder Art von Bodennutzung der Erhalt und Schutz dieser Funktionen sein. Eine große Verantwortung liegt dabei bei der Landwirtschaft, die mehr als die Hälfte der Böden Deutschlands unter Bearbeitung hat.

Das System landwirtschaftlich genutzter Böden mit allen zuvor genannten Funktionen steht im Mittelpunkt der seit 2015 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Initiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie - BonaRes“. Zehn Forschungsverbünde und das koordinierende BonaRes-Zentrum widmen sich seither der Frage, wie langfristig und nachhaltig hohe Erträge erzielt werden können, ohne die anderen Bodenfunktionen negativ zu beeinträchtigen. Die Forschungsverbünde sind dabei interdisziplinär aufgestellt und kombinieren Fragestellungen zu grundlegenden bodenkundlichen Prozessen, über den Pflanzenbau bis hin zur Wirtschaftlichkeit verschiedener Anbausysteme. Es geht insbesondere darum, die Boden-

funktionen zu optimieren, die Wasser- und Nährstoffnutzung effizient zu gestalten sowie Bewirtschaftungsstrategien und das Nutzungsmanagement nachhaltig zu optimieren. Ein Ergebnis von BonaRes wird die Bereitstellung von Handlungsempfehlungen für die praktische Landwirtschaft zur nachhaltigen Bodenbewirtschaftung sein. Eine Besonderheit an BonaRes ist auch die Dauer der Förderung über insgesamt neun Jahre. Diese ermöglichte insbesondere die Anlage und Analyse von mehrjährigen Feldversuchen, aber auch die Auswertung von Daten aus existierenden Dauerfeldversuchen. Einer der zehn Forschungsverbünde ist CATCHY.

CATCHY beschäftigt sich mit dem Einsatz von Zwischenfrüchten als landwirtschaftliche Maßnahme zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit. Zwischenfrüchte wirken sich beispielsweise positiv auf den Humusaufbau und die Verfügbarkeit von Nährstoffen im System Boden-Pflanze aus, dienen dem Schutz vor Erosion und helfen bei der Unkrautbekämpfung. Die detaillierten Zusammenhänge von sehr kleinskaligen mikrobiologischen Prozessen im System Boden-Pflanze über bodenkundliche und pflanzenbauliche Aspekte bis hin zur Wirtschaftlichkeit wurden für verschiedene Zwischenfrüchte und Zwischenfruchtmischungen analysiert und in dieser Broschüre inklusive Empfehlungen für die praktische Landwirtschaft zusammengefasst.

Wir wünschen Ihnen eine angenehme Lektüre.

Ute Wollschläger für das BonaRes-Zentrum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "U. Wollschläger".

Inhaltsverzeichnis



1. Einleitung	5
1.1 Definition und Ziele des Zwischenfruchtanbaus	5
1.2 Geschichte und politisches Umfeld des Zwischenfruchtanbaus	5
1.3 Das Forschungsprojekt CATCHY: Hintergrund, Zielsetzung und Beschreibung	7
2. Strategien zur Integration von Zwischenfrüchten in Fruchtfolgen	11
2.1 Management von Ernteresten	11
2.2 Fruchtfolge, Arten- und Sortenwahl	12
2.3 Aussaatssysteme	13
2.4 Zwischenfruchtdüngung	16
2.5 Steuerung des Absterbeprozesses	17
3. Wie lassen sich Vorteile mehrerer Pflanzenarten in Zwischenfruchtmischungen nutzen?	18
4. Wie Zwischenfrüchte die Bodenstruktur und -qualität beeinflussen	24
4.1 Humusaufbau und Kohlenstoff im Boden	24
4.2 Minderung von Auswaschungsverlusten und Nährstoffhaushalt	26
4.3 Bodenstruktur und Wasserhaushalt	28
5. Blick unter die Oberfläche - wie Zwischenfrüchte den Wurzelraum gestalten	31
5.1 Warum ist die Diversität der Mikroorganismengemeinschaft im Boden überhaupt wichtig?	33
5.2 Effiziente Stickstoffversorgung durch Mikroorganismen	35
6. Wie Zwischenfrüchte den Nährstoffhaushalt beeinflussen	38
6.1 Nährstoffaufnahme	38
6.2 Nährstoffkonservierung	42
6.3 Nährstoffübertrag	43
7. Ertragseffekte auf Hauptkulturen	47
8. Zwischenfruchtanbau im Klimawandel	51
8.1 Etablierungsstrategien	51
8.2 Artenwahl	52
8.3 Gescheiterte Etablierung	53
8.4 Ertragswirkungen	54
8.5 Kosten Zwischenfrüchte der Hauptfrucht Wasser?	54
9. Wann ist der Zwischenfruchtanbau rentabel?	57
9.1 Wie kann die Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus grundsätzlich bewertet werden?	57
9.2 Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus von typischen Betrieben in Süddeutschland	60
9.3 Potenziale zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Ausdehnung des Zwischenfruchtanbaus	61
9.4 Ergebnisse	61
9.5 Zusammenfassung	65
10. Zusammenfassung und Ausblick	67
Artenverzeichnis	71
Referenzen	73

1. Einleitung

Sophia Breische, Carmen Fiedler,

Jan Hendrik Schulz, Matthias Westerschulte

1.1 DEFINITION UND ZIELE DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS

Der Anbau von Zwischenfrüchten beschreibt die Begrünung landwirtschaftlich genutzter Flächen zwischen zwei Hauptkulturen¹. Dafür können verschiedene Pflanzenarten alleine oder im Gemenge genutzt werden. Je nach Betrieb und Fruchtfolge werden diese Anbaupausen zur reinen Bodenregeneration oder zusätzlich zur Futtergewinnung genutzt².



Abb. 1-1: Die wesentlichen Ziele des Zwischenfruchtanbaus.

Dabei hat der Zwischenfruchtanbau nachweislich positiven Einfluss auf biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften¹ und damit eine wesentliche Bedeutung für die Schaffung eines resilienten Pflanzenbausystems.

An dieser Stelle kommt der Aktivierung der Bodenbiologie eine zentrale Rolle zu. Das Zusammenspiel von Zwischenfrucht und Bodenorganismen legt den Grundstein für die Prozessoptimierung im Boden.

Insgesamt sind die Funktionen und Ziele des Zwischenfruchtanbaus im Ackerbau vielfältig und differenzieren je nach Standort, Betriebstyp und Fruchtfolge. Abb. 1-1 gibt einen Überblick.

1.2 GESCHICHTE UND POLITISCHES UMFELD DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS

Die Geschichte des Zwischenfruchtanbaus begann mit der Erkenntnis, dass gewisse Pflanzenarten einen positiven Effekt auf die Entwicklung der nachfolgenden Kulturen haben. Bereits wenige Jahrhunderte vor Christus bezeichnete Cato (234 - 149 v. Chr.), einer der ersten römischen Agrarwissenschaftler, Lupinen (*Lupinus*), Ackerbohnen (*Vicia faba*) und Wicken (*vicia*) als Kulturen, die das Pflanzenwachstum der Folgefrucht positiv beeinflussen. Hildegard von Bingen (1098 - 1179) baute die Weiße Lupine (*Lupinus albus*) zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit in ihren Gärten an. Der Fruchtbarkeitseffekt

dieser Kultur geriet nach ihrem Tod zunächst in Vergessenheit und wurde erst im 18. Jahrhundert wieder bekannt. Friedrich der Große versuchte im Jahr 1784 Sandböden mit einer Gründüngung durch die Lupine aufzuwerten. Gleiches Vorhaben hatten die Agrarwissenschaftler Carl von Wulffen und Albrecht Thaer in 1810. Ihre norddeutschen Sandböden reichten aber nicht für ein erfolgreiches Wachstum der Weißen Lupine. Von Borchard etablierte im Jahr 1840 den Anbau der anspruchslosen Gelben Lupine (*Lupinus luteus*). Zwei Jahre später brachte Theodor H. Rimpau die Serradella (*Ornithopus sativus*) als Gründüngungspflanze von Reisen mit. Der Anbau der Gelben Lupine und der Serradella bewährte sich auf leichten Standorten und weitete sich dort aus. Ernst Albert Schultz-Lupitz (1831–1899) bestätigte das Stickstoff (N)-Anreicherungsvermögen der Leguminosen¹.

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts gewann der Anbau von Zwischenfrüchten zur Futterproduktion an Bedeutung¹. Besonders Rotklee (*Trifolium pratense*), Luzerne (*Medicago sativa*) und Futterrüben (*Beta vulgaris*) wurden zur Aufwertung des Viehfutters genutzt⁴. Ebenso wurde der Vorfruchtwert von Leguminosen zu Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) und Zuckerrüben auf leichten Böden erkannt. Die Förderung der Bodenstruktur und -gare durch die intensive Durchwurzelung sowie die Humusproduktion durch Zwischenfrüchte gewannen zunehmend an Bedeutung¹.

In den 1920er Jahren wurde mit dem „Landsberger Gemenge“ - einer Kombination von Winterwicken (*Vicia villosa*), Welschem Weidelgras (*Lolium multiflorum italicum*) und Inkarnatklee (*Trifolium incarnatum*) - eine Zwischenfrucht- und Futtermischung entwickelt, die insbesondere aufgrund ihres feinen Wurzelwerkes eine nachhaltige Bedeutung als Humusbildner im Zwischenfrucht- und Futterbau einnehmen sollte¹.



Abb. 1-2: Landsberger Gemenge.

Im Laufe der Zeit erwiesen sich weitere Pflanzenarten als gewinnbringende Zwischenfrüchte im Ackerbau.

So wurden zunehmend Klee gras, Ölrettich (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum*) und Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) in Anbausysteme integriert¹.

Im Zuge der „Grünen Revolution“ und zunehmender Nutzung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln nach dem zweiten Weltkrieg verschlankten sich die Fruchtfolgen⁴. Gräser dominierten im Ackerfutterbau und ab 1960 war insbesondere für die Futterproduktion zunehmend Silo- und Körnermais auf deutschen Flächen zu finden⁴. Die EU-agrarpolitische MacSharry-Reform im Jahr 1992 minderte Preisstützen für landwirtschaftliche Erzeugnisse⁵. Folglich fokussierten Landwirte ihre Produktion auf ertragreiche Feldfrüchte, die zumeist spät räumen (z. B. Zuckerrüben). Somit verminderte sich der Anbau von Zwischenfrüchten, die ein frühes Saatfenster benötigen⁴. Nach der Jahrtausendwende gewannen Zwischenfrüchte wieder an Bedeutung. Die EU-Agrarreform im Jahr 2003 und die Einführung der Cross Compliance brachten Landwirten neue Voraussetzungen für den Erhalt von Direktzahlungen⁵. Umweltschonende und die Biodiversität fördernde Maßnahmen rückten in den Fokus, somit auch die Betrachtung von Zwischenfrüchten als Instrument zur Erreichung umweltpolitischer Ziele.

Ein wichtiger politischer Meilenstein im Zwischenfruchtanbau war die Agrarreform von 2014. Diese markierte die Kopplung von Direktzahlungen an die ab 2015 geltenden Greening-Maßnahmen⁵. Eine wichtige Voraussetzung für den Erhalt der Greening-Prämie war die Bereitstellung ökologischer Vorrangflächen (ÖVF), zu welchen auch mit Zwischenfrüchten bestellte Flächen zählen⁴. Darüber hinaus kann der Anbau von Zwischenfrüchten in einfachen Mischungen, in der Regel bestehend aus zwei verschiedenen Arten, aus Budgets für Maßnahmen zur Begünstigung von Agrarumweltflächen finanziell unterstützt werden⁴. Folglich erhielt der Zwischenfruchtanbau eine neue, vor allem wirtschaftliche Relevanz. Die mit Zwischenfrüchten bestellte Fläche nahm mit den EU-Greening-Maßnahmen deutlich zu. Das Förderprogramm endete mit der Neuausrichtung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) am 01. Januar 2023.⁶

Sowohl die GAP 2023 als auch die Farm-to-Fork Strategie sind wesentliche EU-agrarpolitische Maßnahmen, die aus dem europäischen Green Deal gewachsen sind. Der Green Deal soll eine ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft schaffen, die Klimawandel und negative Umweltauswirkungen nicht weiter fördert. Dabei haben sich alle EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet,

bis 2050 klimaneutral zu sein und CO₂-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % zu senken. Im Rahmen der Konzipierung einer neuen GAP wurde im Mai 2020 die Farm-to-Fork-Strategie als eine der wichtigsten Maßnahmen des Green Deal vorgestellt. Sie soll den Weg für gesündere und nachhaltigere Lebensmittel in Europa bereiten und dazu beitragen bis 2050 die europäische Klimaneutralität zu erreichen. Neben der Erhöhung der für die ökologische Landwirtschaft genutzten Fläche sowie der Verbesserung des Tierwohls und der Verringerung von Lebensmittelverlusten, sind die Halbierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln und die Reduktion des Düngemiteleinsatzes um mindestens 20 % wesentliche Ziele der Farm-to-Fork Strategie. Folglich müssen langfristig andere Maßnahmen ergriffen werden, um die Ernährung und Gesunderhaltung von Pflanzenbeständen abzusichern. Aufgrund ihrer nährstoffkonservierenden und phytosanitären Wirkung können Zwischenfrüchte hier einen wesentlichen Beitrag liefern.

Insgesamt sollen mit der GAP 2023 kleinere landwirtschaftliche Betriebe unterstützt und ein Beitrag zur Erfüllung der europäischen Klima- und Umweltziele erreicht werden. Die einzelnen EU-Mitgliedsstaaten können die konkreten Maßnahmen unter Beachtung übergeordneter Regelungen autonom gestalten. In Deutschland ist die Auszahlung der Basisprämie an Landwirte nun unter anderem an die Einhaltung der neun Standards für den guten ökologischen Zustand von Flächen (GLÖZ) gebunden. In Bezug auf Zwischenfruchtanbau ist die Fruchtfolgegestaltung und die Bodenbedeckung über Winter hervorzuheben. Bei den GLÖZ Standards sind ergänzende Verpflichtungen zu beachten.¹⁰⁸

Folglich geht trotz des Wegfalls der Greening-Prämie mit der GAP 2023 und der Farm-to-Fork Strategie eine neue Notwendigkeit des Zwischenfruchtanbaus einher. Mit der zunehmenden Reduktion im Pflanzenschutz- und Düngemiteleinsatz gilt es, im Rahmen des Integrierten Pflanzenbaus, durch intelligente Erweiterung der Fruchtfolge die Pflanzenbausysteme zu optimieren. Zwischenfrüchte können hier einen wichtigen Beitrag leisten⁶.

1.3 DAS FORSCHUNGSPROJEKT CATCHY: HINTERGRUND, ZIELSETZUNG UND BESCHREIBUNG

Mit Blick auf klimatische, gesellschaftliche und ökonomische Herausforderungen gilt es, das Potenzial des Zwischenfruchtanbaus für einen integrierten, nachhaltigen Pflanzenbau bestmöglich auszuschöpfen. Dazu ist es

vor allem wichtig, nicht nur die grundsätzlichen, vielfältigen positiven Effekte des Zwischenfruchtanbaus zu kennen, sondern auch zu verstehen. Um dies zu erreichen ist umfangreiche Forschungsarbeit notwendig. Insbesondere in Bezug auf die Messbarkeit von Bodenparametern zur Beschreibung der biologischen, physikalischen und chemischen Effekte innerhalb der Fruchtfolge gibt es neue technische Methoden, die es ermöglichen, die Wirkung verschiedener Pflanzenarten solo und im Gemenge zu untersuchen. Hier setzt das Forschungsprojekt CATCHY („Zwischenfrüchte als agronomische Maßnahme zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit“) an. Dieses wurde von 2015 bis 2024 im Rahmen der Förderinitiative BonaRes („Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit folgenden Zielen gefördert:

1. Etablierung langfristiger Feldversuche zur Erprobung unterschiedlicher Fruchtfolgen, insbesondere auch diverser Zwischenfruchtmischungen.
2. Bewertung der Wirkung einzelner Arten von Zwischenfrüchten und ihrer Mischungen auf Ernterträge, agronomische Merkmale und auf Bodenparameter wie Größe und Verfügbarkeit von Nährstoffpools, Nährstoffflüsse, Kohlenstoffeinträge in den Boden, Bodenstruktur und die Funktionen und Vielfalt von mit Pflanzen assoziierten- und Bodenmikroorganismen.
3. Die Bedeutung von Wurzelfunktionen für die pflanzliche Nährstoffaufnahme und die Interaktion mit der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden zu verstehen und zu verbessern.
4. Einen Beitrag zur Etablierung verbesserter Bewirtschaftungskonzepte leisten, um die Bodenfruchtbarkeit zu fördern, die Ertragsfähigkeit zu erhalten und das Agrarökosystem zu stabilisieren.
5. Die ökonomische Bewertung der langfristigen Effekte des Zwischenfruchtanbaus.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein Langzeitversuch angelegt, der über 9 Jahre eine kontinuierliche Winterweizen (*Triticum aestivum*) - Zwischenfrucht - Mais (*Zea mays*) Fruchtfolge abbildete. Als Zwischenfrüchte wurden Gelbsenf (*Sinapis alba*), Phacelia, Rauhafer (*Avena strigosa*) und Alexandrinerklee (*Trifolium alexandrinum*) als Reinsaaten und in einer 4er Mischung eingesetzt. Ebenso wurde als 12er Mischung, eine TerraLife® MaisPro, in den Versuch integriert. Als Kontrolle dienten

Parzellen auf denen keine (vgl. Tab. 1-1) Zwischenfrucht ausgesät wurde (Brache). Die Versuchsstandorte lagen in Asendorf (Landkreis Diepholz, Niedersachsen) und Triesdorf (Landkreis Ansbach, Bayern). Die Fruchtfolgen wurden zeitversetzt in den Jahren 2015 und 2016 begonnen, sodass in jedem Jahr Zwischenfrüchte und die Hauptkulturen Mais und Weizen beobachtet werden konnten (Blöcke 1 bzw. 2 in Abb. 1-4).



Abb. 1-3: Standorte der CATCHY Versuche in Deutschland.

Ebenso wurde in einem zweiten, direkt anliegenden Langzeitversuch (Blöcke 3 und 4 in Abb. 1-4) der Einfluss der Fruchtfolgediversifizierung durch die Integration der Ackerbohne als weitere Hauptkultur auf Bodenparameter und Ertragsbildung in der Fruchtfolge getestet. Diese Fruchtfolge wurde in gleicher Weise wie die Winterweizen - Zwischenfrucht - Mais Rotation geführt, allerdings wurde in jedem zweiten Durchlauf der Mais durch eine Ackerbohne ersetzt, sodass eine wiederkehrende Folge von Winterweizen - Zwischenfrucht - Mais - Winterweizen - Zwischenfrucht - Ackerbohne entstand. Diese enthielt dieselben Zwischenfruchtvarianten wie die erste Fruchtfolge. Im Folgenden wird die erste Fruchtfolge "Leg-" genannt, während die zweite als "Leg+" bezeichnet wird. In weiteren Feldversuchen, die ebenfalls an beiden Standorten durchgeführt wurden, wurden weitere Arten auf ihre Eignung als Zwischenfrüchte getestet und systematisch zu Mischungen kombiniert. Diese Versuche wurden in

betriebsübliche Fruchtfolgen integriert und wechselten daher jährlich den Standort. Im Folgejahr wurde auf den Parzellen Mais angebaut, um die Ertragswirkungen zu untersuchen.



Abb. 1-4: Luftbild des Feldversuchs in Asendorf (52.76335 N, 9.02475 E). Der Bereich im roten Rechteck markiert den gesamten Versuchsbereich. Blöcke für verschiedene Startpunkte der beiden Fruchtfolgen sind durch blaue Rechtecke und Zahlen gekennzeichnet. Die Blöcke 1 und 2 sind replizierte Leg- Fruchtfolgen mit einem einjährigen Versatz. Gleiches gilt für die Blöcke 3 und 4 der Leg+ Fruchtfolge (Bild vom Herbst 2021, heruntergeladen von <https://opengeodata.lgln.niedersachsen.de/#dop>).

Die Jahresdurchschnittstemperatur an den beiden Standorten Triesdorf und Asendorf beträgt im langjährigen Mittel 9,1° C und 9,3° C. Die langjährigen mittleren Niederschläge liegen in Triesdorf bei 686 mm und in Asendorf bei 751 mm. In den Jahren der Experimente zwischen 2015 und 2022 lagen die Niederschläge im Mittel bei 595 mm in Triesdorf und bei 790 mm in Asendorf. Der Boden in Triesdorf ist eine pseudovergleyte Braunerde mit weiter Spannweite der Textur von sandigem (S) bis schluffigem Lehm (Lu) (Mittelwerte: Ton 16 %, Sand 50 %, Schluff 45 %). Der mittlere Humusgehalt im Oberboden beträgt 2,4 % (1,4 % C_{org}) und die pH-Werte liegen im Mittel bei 7,4. In Asendorf treten pseudovergleyte Parabraunen aus einer flachen Lössschicht über glazifluvialen Sanden auf. Entsprechend ist die Textur am Standort Lehmschluff (Mittelwerte: Ton 8 %, Sand 19 %, Schluff 73 %) mit einem mittleren Humusgehalt von 3,0 % (1,7 % C_{org}) und pH-Werten um 6,5.

Ein entscheidender Faktor für die Effekte des Zwischenfruchtanbaus ist das pflanzenbauliche Management von Zwischenfrüchten. Um genaue, aber trotzdem praxisnahe Ergebnisse zu erhalten, wurde die Bewirtschaftung der Versuche wie im Folgenden beschrieben durchgeführt. Die Böden wurden ausschließlich nicht-wendend

bearbeitet und die Bearbeitungstiefe lag je nach vorgefundener Bodenstruktur bei bis zu 20 cm. Die tiefe Lockerung der Böden erfolgte je nach Bedarf vor der Aussaat des Winterweizens und der Zwischenfrüchte. Vor der Aussaat der Sommerungen wurde überwiegend eine flache Bearbeitung durchgeführt, um die Zwischenfruchtreste zu zerkleinern und einzumischen. Bei unzureichenden Frostereignissen im Winter wurde die Zwischenfrucht mit einem Totalherbizid abgetötet und bei Bedarf mit einem Mulcher zerkleinert. Die Aussaat der Kulturen erfolgte mit praxisüblicher Technik, sprich Einzelkornsämaschinen bei Mais und Doppelscheibendrillmaschinen bei allen anderen Kulturen. Der Pflanzenschutz wurde nach gesetzlichen Vorgaben mit chemisch-synthetischen Mitteln durchgeführt. Die Düngung der Grundnährstoffe (P, K, Mg, S) erfolgte jeweils zu den Hauptkulturen und entsprach in der Höhe den durchschnittlichen Entzügen der jeweiligen Kulturen am jeweiligen Standort. Die Höhe der Stickstoffdüngung orientierte sich an der jeweils gültigen Düngeverordnung (DüV). Um mögliche Nährstoffeffekte besser sichtbar zu machen, wurde der N-Dünge-

bedarf, angelehnt an die roten Gebiete der DüV, bei den Hauptkulturen um 20 % reduziert. Bei Mais wurden zudem pauschal 40 kg N für die N-Lieferung der Zwischenfrüchte abgezogen. Die Düngung erfolgte rein mineralisch und für alle Versuchsvarianten gleich. Die Erntereste wurden nicht abgefahren.



Abb. 1-5: Bild vom Feldversuch in Asendorf (Aufnahme vom 12. Oktober 2017, Dörte Schweneker).

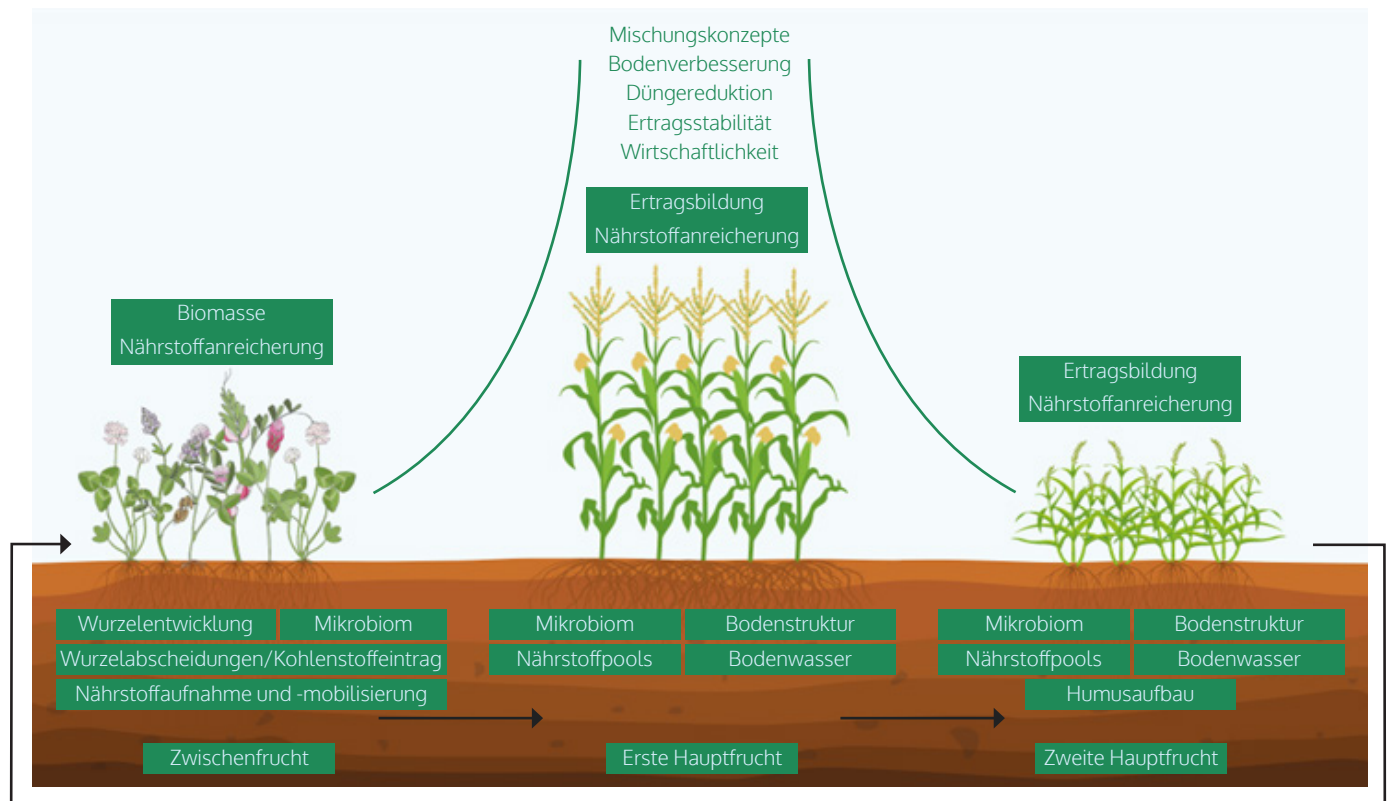


Abb. 1-6: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Forschungsschwerpunkte des CATCHY-Projekts. Pflanzenbilder nach Kutschera.⁷

Tab. 1-1: Zusammensetzung der geprüften Mischungen.

MISCHUNG	ARTEN	BOT. BEZEICHNUNG	GEWICHTSANTEIL (%)	AUSSAATSTÄRKE (kg/ha)
12er Mischung (TerraLife® Mais Pro)	Felderbse	<i>Pisum sativum</i>	38	35
	Sorghum	<i>Sorghum bicolor</i>	14	
	Phacelia	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	7	
	Öllein	<i>Linum usitatissimum</i>	8	
	Pannonische Wicke	<i>Vicia pannonica</i>	6	
	Rettich	<i>Raphanus sativus</i>	5	
	Ramtillkraut	<i>Guizotia abyssinica</i>	4	
	Sonnenblume	<i>Helianthus annuus</i>	2	
	Leindotter	<i>Camelina sativa</i>	2	
	Perserklee	<i>Trifolium resupinatum</i>	4	
	Schwedenklee	<i>Trifolium hybridum</i>	5	
	Inkarnatklee	<i>Trifolium incarnatum</i>	5	
4er Mischung	Gelbsenf	<i>Sinapis alba</i>	16	25
	Phacelia	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	20	
	Rauhafer	<i>Avena strigosa</i>	36	
	Alexandrinerklee	<i>Trifolium alexandrinum</i>	28	

Die Aussaatstärken der Zwischenfrüchte orientierten sich an den Empfehlungen von RENIUS¹ für die Reinsaat von Gelbsenf 18 kg ha⁻¹, Phacelia 12 kg ha⁻¹, Rauhafer 100 kg ha⁻¹ und Alexandrinerklee 25 kg ha⁻¹. Die Charakterisierung der beiden Mischungen ist Tab. 1-1 zu entnehmen.

In dieser Broschüre werden die Ergebnisse der projekt-eigenen Versuche dargestellt und in den Kontext von Literaturergebnissen gestellt. So wird ein umfassender Einblick in den aktuellen Forschungsstand zum Einfluss von Zwischenfrüchten auf Boden- und mikrobielle Funktionen auf das Nährstoffmanagement und die Ertragsbildung der Hauptkulturen sowie auf die Nachhaltigkeit von Fruchtfolgen gewährt.



Abb. 1-7: Die Zwischenfruchtmischung TerraLife® MaisPro wurde als biodiverse Mischung mit zwölf Pflanzenarten (12er Mischung) im CATCHY-Projekt untersucht.

2. Strategien zur Integration von Zwischenfrüchten in Fruchtfolgen

Sophia Breische, Carmen Fiedler,

Jan Hendrik Schulz, Matthias Westerschulte

Der Erfolg einer Zwischenfrucht ist maßgeblich von einem gut entwickelten Bestand abhängig. Dabei erstreckt sich das richtige Management von der Wahl der Vorfrucht und der entsprechenden Zwischenfrucht, über die Aussaattechnik bis zur Saatbettbereitung der Folgefrucht.

2.1 MANAGEMENT VON ERNTERESTEN

Vor der Ernte der Vorkultur sind bereits einige Aspekte für die Etablierung von Zwischenfrüchten zu berücksichtigen. Abhängig von der Vorkultur verbleibt organische Masse verschiedener Art, Menge und räumlicher Verteilung auf der Fläche. Diese kann die Etablierung der Zwischenfrucht unterschiedlich beeinflussen. Bei vorangegangenen Druschfrüchten kann beispielsweise das Stroh geräumt oder auf der Fläche belassen werden. Um einen sicheren Aufgang der Zwischenfrucht zu garantieren, sind verschiedene Punkte zu berücksichtigen:

- Das feine Häckseln der Pflanzen- und Strohreste verringert den mechanischen Widerstand gegenüber den Zwischenfruchtkeimlingen¹⁷.
- Eine homogene Verteilung der Erntereste fördert einen gleichmäßigen Feldaufgang.

- Die Art und Menge der Erntereste nimmt Einfluss auf die Saattechnik. Eine zu dicke Strohschicht kann beispielsweise die Sämaschine verstopfen.
- Die Art und Menge der Erntereste entscheidet über die Nährstoffdynamik im Boden. Beispielsweise hat Getreidestroh ein sehr weites C/N-Verhältnis, wodurch nach Einarbeitung in den Boden die N-Verfügbarkeit für die Zwischenfrucht deutlich eingeschränkt sein kann⁴.
- Beim Umgang mit Ernteresten vor der Etablierung der Zwischenfrucht, ist stets die standortspezifische Bodenbeschaffenheit sowie die aktuelle Witterung zu berücksichtigen.
- Die Bedeckung der Bodenoberfläche durch Erntereste schützt vor Wasserverdunstung, Verschlämmung und Erosion.

Zudem entscheidet das Ausfall- und Durchwuchsverhalten der vorangegangenen Kultur über Saatbettbereitung und Wahl der Zwischenfrucht. Besonders Gerste (*Hordeum vulgare*) und Roggen (*Secale cereale*) können in Zwischenfruchtbeständen durchwachsen⁸. Folglich gilt es, in solchen Fruchtfolgen die Bodenbearbeitung anzupassen und konkurrenzstarke Zwischenfrüchte zu

wählen, die sich schnell etablieren und dem Ausfallgetreide Licht, Wasser und Nährstoffe entziehen.

2.2 FRUCHTFOLGE, ARTEN- UND SORTENWAHL

POSITIONIERUNG IN DER FRUCHTFOLGE

Um eine bestmögliche Wirkung der Zwischenfrucht zu erzielen, gilt es ihre Positionierung in der Fruchtfolge gut zu überlegen. Dabei spielen verschiedene Parameter eine Rolle:

- **Vegetationszeit und Witterung**
Der Zwischenfrucht muss für eine optimale Etablierung die entsprechende Zeit zum Wachstum eingeräumt werden¹⁴. Je mehr Zeit sie für vegetatives Wachstum hat, desto mehr Biomasse kann sie bilden und entsprechend ihre vielfältigen, positiven Wirkungen ausüben. Insgesamt hat sich die Regel „Ein Tag Wachstum der Zwischenfrucht im Juli entspricht einer Woche Wachstum im August und einem Monat Wachstum im September“ bewährt⁹. Bei einer späten Aussaat besteht in Abhängigkeit der Zwischenfruchtart das Risiko eines unregelmäßigen und zum Teil ausbleibenden Feldaufgangs. Welche Arten frühe bzw. späte Aussaaten tolerieren, wird im Teilkapitel „Arten- und Sortenwahl“ genauer erläutert. In Anbetracht zunehmend trockener und heißer Sommermonate sollten auch Zwischenfrüchte, die hohe Temperaturen tolerieren und geringe Ansprüche an die Wasserversorgung haben, ausgewählt werden. Dazu zählt beispielsweise Sorghum (*Sorghum sudanense*).
- **Ansprüche der Folgefrucht**
Weiterhin nimmt die Folgefrucht Einfluss auf die Wahl der Zwischenfrucht. Soll im anschließenden Frühjahr zum Beispiel die Zuckerrübe in Mulchsaat etabliert werden, sollte die zuvor platzierte Zwischenfrucht eine besonders feine, nicht zu üppige Biomasse hinterlassen⁸. Für ein ideales Saatbett sollte die Zwischenfrucht in diesem Fall wenig Lignin bilden (z. B. Leguminosen wie Futtererbsen oder Saatwicken), um zu gewährleisten, dass sich die Pflanzenreste leicht einarbeiten lassen. Einige Zwischenfruchtarten erreichen schneller das Stadium der Samenreife als andere und können damit zu Durchwuchsproblemen in der Folgekultur führen. Beispielsweise ist hier der Buchweizen (*Fagopyrum tataricum*) zu nennen, welcher als Knöterichgewächs besonders in Zuckerrübenbeständen schwierig zu bekämpfen ist.

- **Phytosanitäre Vorsorge**
Um Fruchtfolgekrankheiten vorzubeugen, gilt es bei vielen Hauptkulturen Anbaupausen einzuhalten. Dies hat entsprechend auch Auswirkungen auf die Wahl der Zwischenfrucht. Pflanzenarten, die spezifische Krankheitserreger der Hauptkulturen fördern, sollten ausgeschlossen oder nur in geringem Umfang genutzt werden. Im Rapsanbau (*Brassica napus*) wird diesbezüglich zum Beispiel eine mindestens drei- bis vierjährige Unterbrechung des Anbaus empfohlen. Auf diese Weise kann der Verbreitung von Schaderregern, die Krankheiten wie Kohlhernie oder Verticillium auslösen, entgegengewirkt werden¹⁰. Viele Pflanzenpathogene befallen aber nicht nur den Raps, sondern auch andere Kreuzblütler. Daher sollten diese bei der Wahl der Zwischenfrucht für die betriebseigene Fruchtfolge eine besondere Berücksichtigung finden. Schon geringe Anteile an z. B. Senf, Tiefenrettich (*Raphanus sativus*) oder Leindotter (*Camelina sativa*) können die Verbreitung von Kohlhernie auf der Fläche fördern. Die Leguminosen Alexandrinerklee und Perserklee (*Trifolium resupinatum*) hingegen können der Vermehrung des Kohlhernieerregers entgegenwirken⁹. Stehen Leguminosen wie Ackerbohnen, Lupinen oder Erbsen (*Pisum sativum*) als Hauptkultur in der Fruchtfolge, gilt es den Anteil an Leguminosen in Zwischenfruchtmischungen zu berücksichtigen. Je nach Leguminose gilt es mehrjährige Anbaupausen einzuhalten, um Ertragsausfällen, bedingt durch Leguminosenmüdigkeit, vorzubeugen⁹.

AUSSAATTERMIN BESTIMMT ARTENSPEKTRUM

Entscheidend für die Wahl der Zwischenfruchtart bzw. -mischung ist der Zeitraum des Räumens der Vorfrucht. Darüber definiert sich die verbleibende Vegetationszeit bzw. die Zeit bis zur Aussaat der kommenden Hauptfrucht. In dieser Zeit gilt es über einen gut etablierten Bestand und damit verbunden hohem Blattflächenindex, eine möglichst hohe Fotosyntheserate zu erzielen, welche die Ausscheidungen von Wurzelexsudaten entsprechend steigert. Zeitgleich sollte ein eventuelles Aussaaten der Zwischenfrucht möglichst verhindert werden. Somit sind Geschwindigkeit und Länge von vegetativem und generativem Wachstum richtig abzuschätzen. Entsprechend sollten bei früh räumenden Hauptkulturen (z. B. Wintergerste) Arten bzw. Sorten mit möglichst später generativer Phase (z. B. Ramtillkraut, Abyssinischer Kohl) gewählt werden. Bei später räumenden Hauptkulturen

(z. B. Winterweizen) sind entsprechend Arten bzw. Sorten mit rascher vegetativer und zumeist früherer generativer Phase vorzuziehen (z. B. Ölrettich, Buchweizen). Detaillierte Informationen zu den Saatzeiten einzelner Zwischenfruchtarten sind in Kivelitz (2017)⁹ und Lütke-Entrup et al. (2018)⁴ nachzulesen. Insbesondere wenn eine Futternutzung in Form von Schnitt- oder Weidenutzung beabsichtigt ist (z. B. auch Mob Grazing), gilt es, den Saatzeitpunkt und verwendete Pflanzenarten entsprechend aufeinander abzustimmen. Nur so kann ein qualitativ und quantitativ gut nutzbarer Bestand etabliert werden. Beispielsweise gibt es sehr frohwüchsige Zwischenfruchttypen des Einjährigen Weidelgrases, die wesentlich schneller nutzbare Biomasse bilden können, als das im Vergleich langsamere Welsche Weidelgras.



Abb. 2-1: Beispiel einer vielfältigen Zwischenfruchtmischung.

2.3 AUSSAATSYSTEME

Mit Blick auf das Aussaatssystem ist es wichtig, zwischen fein- und grobkörnigeren Arten zu differenzieren. Viele Zwischenfruchtarten, wie Perser- oder Alexandrinerklee, gehören zu den Feinsämereien und benötigen eine flachere Ablagetiefe von ein bis zwei Zentimetern¹¹. Grobkörnige Leguminosen hingegen sollten je nach Art der Keimung tiefer abgelegt werden. Dabei

keimen Lupinen epigäisch (oberirdisch) und bedürfen deshalb einer Ablagetiefe von zwei bis maximal vier Zentimetern. Hingegen keimen Erbsen, Ackerbohnen und Wicken hypogäisch (unterirdisch) und benötigen deshalb eine tiefere Ablage von mindestens vier bis fünf Zentimetern für eine ideale Etablierung⁴. Um mehrere Arbeitsgänge und Überfahrten zu vermeiden, muss bei der Feldbestellung mit einer vielfältigen Zwischenfruchtmischung entsprechend ein Kompromiss gefunden werden. Für die meisten Mischungen empfehlen sich Saattiefern von maximal 2-3 cm.

Ziel ist es, den Saatkörnern ausreichend Bodenschluss und Wasserzufuhr zu bieten, um einen gleichmäßigen Feldaufgang und eine zügige Jugendentwicklung zu erzielen¹¹. Dabei sind stets die spezifischen Begebenheiten auf der Fläche und die Ansprüche der gewählten Zwischenfrucht zu berücksichtigen. Unter trockenen Bedingungen kann das Anwalzen eine unterstützende Wirkung für den Keimerfolg bieten. Wichtig ist hierbei, dass der Boden trotzdem offen bleibt, um die Bodenatmung zu gewährleisten. Traditionell wird zwischen drei Aussaatssystemen unterschieden:

- Blanksaat
- Mulch- und Stoppelsaat
- Direktsaat

BLANKSAAT

Bei diesem Aussaatverfahren werden Stroh- und Pflanzenreste nach der Ernte der Vorfrucht durch wendende Bodenbearbeitung tief eingearbeitet⁴. Auf diese Weise wird der Zwischenfrucht ein reines Saatbett geboten. Besonders auf leichten Böden sollte die Krume nach dem Pflugeinsatz rückverfestigt werden. Der Maschineneinsatz ist auf die vorherrschenden Bodenverhältnisse anzupassen.

AUSSAATTECHNIK IN DER BLANKSAAT

Die Drillsaat auf der Pflugfurche schafft beste Voraussetzungen für eine gleichmäßige Kornablage der Zwischenfrucht. Ohne Pflanzenreste der Vorfrucht können die Drillschare den Boden einfacher durchdringen und das Saatgut exakt ablegen⁸. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Körner gleichmäßig mit Boden bedeckt sind, wodurch ein gleichmäßiger Feldaufgang gefördert wird. Unter anderem durch die geringe Flächenleistung beim Pflugeinsatz und die vergleichsweise hohen Energiekosten, ist die Blanksaat zur Zwischenfrucht vielerorts in den letzten Jahren eher rückläufig⁹.

Tab. 2-1: Vor- und Nachteile der Blanksaat (zusammengestellt nach verschiedenen Quellen^{4,11-14}).

VORTEILE	NACHTEILE
• Minimale Konkurrenz durch Unkräuter und Ausfallgetreide • Befreiung der Bodenoberfläche von Ernteresten vereinfacht die gleichmäßige Saatgutablage • „Grüne Brücke“ für Pflanzenpathogene wie z. B. Blattläuse oder Phoma wird unterbrochen • Besonders feinkörnige Zwischenfrüchte können sich in der Blanksaat gut etablieren • Tiefe Lockerung des Bodens wird durch die Zwischenfrucht wieder stabilisiert	• Kein Verdunstungsschutz und hohe Erosionsgefahr durch fehlende organische Masse • Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit von Bodenorganismen durch fehlende Mulchauflage und intensive Bodenbearbeitung • Intensiver Eingriff in die Bodenstruktur bis hin zur Förderung von Pflugsohlenverdichtungen • Arbeitsgänge nur bedingt kombinierbar • Geringe Flächenleistung und hohe Energiekosten

MULCH- UND STOPPELSAAT

Dieses Aussaatverfahren beschreibt eine flache bis tiefe nicht wendende Bodenbearbeitung und anschließende Ablage des Saatkorns in den mit Pflanzenresten durchmischten oberen Bodenhorizont. Auf diese Weise soll das Austrocknen sowie der Verlust von Humus reduziert und die Flächenleistung gesteigert werden. Es können je nach Unkrautmanagement ein bis mehrere Bearbeitungsschritte vor der Zwischenfruchtaussaat erfolgen.



Abb. 2-2: Zwischenfruchtaussaat während der flachen Bodenbearbeitung (DSV 2015).

VERFAHRENSTECHNIK IN DER MULCHSAAT

Auch auf Flächen mit einer Auflage aus Pflanzenresten kann die Drille zum Einsatz kommen. Je nachdem, wie gleichmäßig und intensiv Stroh und weitere organische Masse in den Boden eingearbeitet wurden, kann die exakte Kornablage erfolgen⁹. Um Zeit und Kosten zu sparen, kann die Zwischenfrucht auch mit Hilfe eines auf Grubber oder Scheibenegge montierten Pneumatikstreuers auf der Fläche verteilt werden. Dabei wird das Saatgut breitflächig über Aggregate oder Schläuche vor oder in der Packerwalze verteilt⁹.

Ein besonders einfaches und günstiges Aussaatverfahren ist die Breitverteilung des Saatguts mit einem Düngerstreuer. Insbesondere hier besteht das Risiko eines unregelmäßigen Feldaufgangs. Dunkelkeimer und Zwischenfruchtarten mit Anspruch auf eine bestimmte Ablagetiefe sind in der Keimung gehemmt. Bei Trockenheit kann es im Vergleich zur Drillsaat zu einer deutlichen Verzögerung der Keimung (ca. 7 - 14 Tage) kommen. Je nach Aussaatbedingung - Rückverfestigung und Gare des Bodens sowie Feuchtigkeit - kann es sinnvoll sein, die Aussaatmenge um bis zu 20 % zu erhöhen⁹.

Tab. 2-2: Vor- und Nachteile der Mulch- und Stoppelsaat (zusammengestellt nach verschiedenen Quellen)¹¹⁻¹⁴

VORTEILE	NACHTEILE
• Schutz vor Erosion und Verdunstung • Reduzierter Bodeneingriff fördert Bodenleben und Bodenstruktur • Die mögliche Kombination von Bodenbearbeitungs- und Streugerät verringert die Anzahl an Überfahrten • Höhere Flächenleistung	• Gefahr der unzureichenden Ablagegenauigkeit für einige Pflanzenarten • Risiko ungleichmäßigen Feldaufgangs • Erleichtertes Überdauern für Pflanzenpathogene • Konkurrenz durch schnellwachsendes Ausfallgetreide • Bodenbearbeitung kostet Wasser

DIREKTSAAAT

Bei diesem Verfahren entfällt die Bodenbearbeitung nach der Ernte und Reste der Vorfrucht werden höchstens mechanisch zerkleinert. In der Regel wird die Zwischen-

frucht hierbei direkt in das Stroh bzw. die Stoppeln einer vorangegangenen Druschfrucht ausgesät¹⁴. Dadurch soll insbesondere wasserschonend gearbeitet und möglichst wenige Unkräuter und -gräser zum Keimen gereizt werden.

AUSSAATTECHNIK IN DER DIREKTTSAAT

Die Direktsaat stellt die höchsten Anforderungen an die Technik. Im Wesentlichen sind dabei der Durchfluss der Erntereste, besonders bei größeren Stroh-mengen, die Ablagegenauigkeit des Saatguts sowie die Rückverfüllung des Saatschlitzes und somit ein sicherer Bodenschluss zu nennen. In der Praxis haben sich speziell entwickelte Direktsaatmaschinen, beispielsweise besondere Scheiben- oder Zinkensämaschinen bewährt. Natürlich gilt es, die betriebsspezifische Maschinenausstattung zu berücksichtigen. Es empfiehlt sich, die Direkt-

saat möglichst kurzfristig nach der Ernte der Vorfrucht durchzuführen. Auf diese Weise wird der Zwischenfrucht eine möglichst lange Vegetationszeit ermöglicht. Außerdem ermöglicht die Minimierung der Verdunstung eine optimale Nutzung der Wasserreserven. Darüber hinaus kann sich die Zwischenfrucht bei Aussaat direkt nach der Ernte der Hauptfrucht zügig etablieren und somit die Auflauftrate von Unkräutern und Ausfallgetreide gering halten. Durch Stroh- und Stoppelreste besteht dennoch ein etwas erhöhtes Risiko eines unregelmäßigen Feldaufgangs.

Tab. 2-3: Vor- und Nachteile der Direktsaat (zusammengestellt nach verschiedenen Quellen)^{4,14,15}.

VORTEILE	NACHTEILE
• Weniger Überfahrten und verbesserte Tragkraft verringern das Verdichtungsrisiko • Geringeres Erosions- und Verdunstungsrisiko • Förderung des Bodenlebens und der Humusbildung durch ausbleibende Bodenbearbeitung und verbleibende Biomasse an der Bodenoberfläche • Rasche Unterdrückung von auflaufendem Ausfallgetreide • Unterdrückung von lichtkeimenden Unkräutern durch den Wegfall der Bodenbearbeitung	• Mögliches Überdauern von Pflanzenpathogenen und Problemunkräutern oder -gräsern • Hoher Anspruch an die Technik und den Aussaatzeitpunkt, dadurch erhöhtes Risiko für zu geringen Bodenschluss und unregelmäßigen Feldaufgang (insb. für grobkörniges Saatgut) • Risiko durch Mäuse- und Schneckenfraß

ALTERNATIVE AUSSAATTECHNIKEN

UNTERSAAATEN

Um einen brachlosen Übergang von der Haupt- in die Zwischenfrucht zu gewährleisten, haben sich Untersaaten bewährt. Dabei werden bisher überwiegend verschiedene Klee- oder Gräserarten bzw. -gemenge in den stehenden Bestand der Hauptkultur gesät. Sortenwahl, Düngung und Herbizideinsatz zur Deckfrucht haben wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Untersaat¹¹. Es gilt eine Untersaat zu wählen, die alle pflanzenbaulichen Maßnahmen in der Hauptfrucht überdauern kann, aber möglichst nicht in Konkurrenz mit ihr tritt.

Zur Etablierung einer Untersaat hat sich der Einsatz eines Striegels oder einer Hacke mit darauf montiertem Säkas-ten bzw. Pneumatikstreuer bewährt. Je nach Standort und Witterung kann die Untersaat aber auch ohne Einarbeitung funktionieren. Der Zeitpunkt der Einbringung der Untersaat ist stark abhängig von der entsprechenden Hauptkultur und der gewählten Untersaatart. Insbesondere im Maisanbau hat sich das Verfahren bewährt. Hier kann beispielsweise der eher langsame wachsende Rotschwingel direkt mit der Maisaussaat eingebracht

werden, während Deutsches oder Welsches Weidel-gras erst ab dem 6- bis 8-Blatt-Stadium geeignet sind. Durch dieses Verfahren kann die recht kurze Vegetationszeit nach der Ernte des Maises sehr effizient mit einer Zwischenfrucht begrünt werden.



Abb. 2-3: Die Untersaat sorgt nach der Ernte der Hauptkultur (hier Mais) weiterhin für Begrünung (DSV 2014).

MÄHDRUSCHSAAT

Um Überfahrten zu reduzieren und Arbeitsspitzen zu brechen, können Sägeräte auch direkt an der Erntemaschine angebracht werden. Die sogenannte Mähdruschsaat ermöglicht, ähnlich wie bei einer Untersaat, eine bessere Ausnutzung der Vegetationszeit. Zur technischen Umsetzung kann entweder eine Direktsaatvorrichtung oder ein streuender Saatguttank an die Erntemaschine montiert werden. Letzteres Verfahren ist einfacher in der Handhabung und günstiger in der Umsetzung, streut das Saatgut aber lediglich auf die Stoppeln. Versuche an der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) in den Jahren 2008 und 2009 ergaben jedoch, dass die Aussaat von Senf mittels Mähdruschverfahren auf Flächen mit Strohauflage keine Verschlechterung im Vergleich zur Direkt- oder Grubbersaat aufzeigte. Dies bestätigt die Annahme, dass eine Zwischenfruchtetablierung, die möglichst nah am Erntetermin der Vorfrucht liegt, zu einer schnelleren Bodenbedeckung führt¹⁶. Ein Nachteil ist der höhere Energie- und Zeitbedarf während des Mähdrusches.

DROHNENSAAT

Auch durch den Einsatz einer Drohne kann die Zwischenfrucht noch vor der Ernte der Vorfrucht ausgesät werden. Ähnlich der Untersaat, birgt dieses Verfahren das Potenzial, den Ackerboden nach der Ernte noch schneller zu bedecken und Brachezeiten zu verringern. Auf diese Weise wird der Vegetationszeitraum des Zwischenfruchtbestandes verlängert. Im Vergleich zur konventionellen Zwischenfruchtaussaat mit Schlepper und Sämaschine, kann durch den Gewinn an Vegetationszeit eine schnellere Etablierung der Zwischenfrucht erreicht werden. Dieser kann vier Wochen nach der Ernte der Hauptfrucht zu einem bis zu 25 % höheren Bedeckungsgrad führen. Folglich können die vielfältigen Vorteile der Zwischenfrucht schneller erreicht werden. Neben dem Zeitgewinn ist ein wesentlicher Vorteil, dass Überfahrten eingespart und somit Strukturschäden verhindert werden können¹⁰⁶. Ein Risiko des Verfahrens ist, dass das Saatgut nur auf den Boden gestreut wird und somit kein idealer Bodenschluss gewährleistet werden kann. Diesem Risiko wirkt entgegen, dass das Saatgut zunächst von der absterbenden Hauptkultur beschattet und nach der Ernte von den Ernteresten bedeckt wird, wodurch sich ein günstiges Mikroklima ergibt. Es haben sich Zwischenfruchtmischungen, die verschiedene Pflanzenarten enthalten, bewährt. Auf diese Weise können

sich die einzelnen Arten entsprechend des Witterungsverlaufes gegenseitig kompensieren. Die Erhöhung der Aussaatmenge ist nach ersten Erkenntnissen keine Voraussetzung¹⁰⁶. Schmidt bestätigt, dass beispielsweise die Zwischenfruchtmischung TerraLife® MaisPro TR in der empfohlenen Aussaatstärke sehr gute Feldaufgänge erzielte¹⁰⁶. Darüber hinaus sei die Drohnensaat im Vergleich zur Bodenbearbeitung und Aussaat mit dem Schlepper deutlich günstiger und zeitsparender. Insgesamt wird der Drohnensaat eine zunehmende Bedeutung zugeschrieben¹⁰⁶.

2.4 ZWISCHENFRUCHTDÜNGUNG

Die Nährstoffdynamik in Zwischenfruchtbeständen zu beschreiben ist sehr komplex, da sie von vielfältigen Parametern abhängig ist. U. a. sind Bodenart und -qualität, Nährstoffnachlieferungspotenzial, Wasserversorgung, Artenzusammensetzung, Aussaatbedingungen und Entwicklungsstadium der Zwischenfrucht zu nennen¹⁰⁷. Besonders die Zielsetzung mit Blick auf die Folgekultur und eine mögliche Nutzung der Zwischenfrucht, aber auch die Nährstoffversorgung durch die Vorfrucht definieren einen möglichen Nährstoffbedarf. Ob eine Düngung durchgeführt werden kann, entscheiden zunächst die Vorgaben der Düngeverordnung (DÜV) und die jeweilige Gebietskulisse, in der sich die Fläche befindet. Folglich ist die Düngung sehr individuell und stets im Rahmen guter fachlicher Praxis durchzuführen. Die Biomassebildung der Zwischenfrucht wird maßgeblich über die Stickstoffversorgung gesteuert. Um die Jugendentwicklung zu fördern, hat sich je nach Standort und vorherrschendem C/N-Verhältnis eine Startgabe von 30 bis 60 kg N/ha bei stickstoffbedürftigen Pflanzenarten wie Ölrettich oder Gelbsenf bewährt⁴. Eine Unterversorgung kann zu unzureichend entwickelten Beständen führen, welche folglich ihre Funktionen nur eingeschränkt erfüllen können. Wichtig ist es zu berücksichtigen, dass Leguminosen keinen Bedarf einer zusätzlichen Stickstoffdüngung haben. Ebenso kann auf Böden mit hoher N-Nachlieferung und guter Struktur auch ohne Stickstoffgabe ein üppiger Zwischenfruchtaufwuchs entstehen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Versorgung der Zwischenfrucht mit Nährstoffen hat das Strohmanagement. Diesbezüglich ist zunächst zu beachten, dass bei der Ernte der Vorfrucht das Stroh fein gehäckselt und gleichmäßig auf der Fläche verteilt wird. Dafür sollte der gute Zustand der Häckselmesser sichergestellt sein

sowie ein Spreuverteiler der Schwadablage vorgezogen werden. Die Einarbeitung des Strohs regt die Nährstoffmineralisierung und Spreuzersetzung im Boden an. Dabei sollten die Erntereste flach eingearbeitet werden. Ein Pflugeinsatz kann zu einer Strohmatte im Unterboden führen, welche die Nährstoffdynamik (u. a. durch Fäulnisprozesse) negativ beeinflusst. Besonders wichtig ist es auch, das weite C/N-Verhältnis lignifizierter Ernterückstände zu berücksichtigen, welches in der Regel zwischen 40:1 bis 80:1 liegt. Getreidestroh allein enthält nur 0,5 % Stickstoff und hat ein C/N-Verhältnis von ca. 80:1. Die Erntereste sind nicht die unmittelbare Stickstoffquelle für die Zwischenfrucht selbst, sondern vielmehr für die Mikroorganismen, die Stroh und Stoppeln zersetzen. Bei weiten C/N-Verhältnissen über 25:1 kommt es zu einer temporären mikrobiellen N-Sperre im Boden. Erst bei fortschreitender Zersetzung entstehen die pflanzenverfügbaren N-Formen Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-), die von der Zwischenfrucht genutzt werden können. Ohne zusätzliche N-Zufuhr oder Nachlieferung aus dem Boden, können Zwischenfrüchte während der Strohersetzung unter N-Mangel leiden. Sollte eine N-Zufuhr aus rechtlichen Gründen nicht möglich sein, kann eine Strohabfuhr ratsam sein. Bei der Zwischenfruchtdüngung ist in jedem Fall auf den rechtlichen Rahmen im jeweiligen Anbaubereich zu achten. Zur konkreten Düngeplanung wird an dieser Stelle auf die regionale Officialberatung verwiesen.

2.5 STEUERUNG DES ABSTERBEPROZESSES

Die Steuerung des Absterbeprozesses der Zwischenfrucht hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Folgekultur. Dabei ist grundsätzlich zwischen abfrierenden und winterharten Zwischenfrüchten zu unterscheiden.

Frost leitet den Absterbeprozess abfrierender Zwischenfrüchte ein. Dabei hat das Absterben der Zwischenfrucht eine wesentliche Bedeutung für die Mineralisation der Nährstoffe¹⁸. Je nach Standort und Jahreswitterung kann die mechanische Behandlung der Pflanzen mittels einer Walze unterstützend wirken. Hier fördert vor allem das Abknicken der Pflanzenhalme das Absterben des Bestandes. Um den Boden in den feuchten Wintermonaten vor Verdichtungen zu schützen, ist das Walzen auf gefrorenen Böden sinnvoll. Ebenso kann durch die Unterstützung des Absterbeprozesses die Nährstofffreisetzung entsprechend dem Bedarf der Folgekultur gesteuert werden.

Geräte, welche die Pflanzen intensiv zerkleinern, können viel Pflanzensaft austreten lassen und dadurch Nährstoffverluste auslösen. Dazu gehören Mulcher oder Fräsen. Der Einsatz von Bodenbearbeitungsgeräten wie Scheibeneggen oder Grubbern sollte erst kurz vor der Saatbettbereitung der Folgekultur erfolgen, um eine möglichst lange Bodenbedeckung über die Wintermonate zu erhalten. Hier sind rechtliche Fristen einzuhalten. Mit der mechanischen Einarbeitung kann dann aber die Nährstoffmineralisierung weiter gefördert werden¹⁸. Art und Struktur des Bodens sowie das Aussaatssystem der folgenden Hauptkultur entscheiden über die Wahl des Bearbeitungsgerätes sowie die Lockerungstiefe.

Die Vegetationszeit winterharter Zwischenfrüchte erstreckt sich bis ins Frühjahr und darüber hinaus. Entsprechend können diese Zwischenfrüchte verstärkt Konkurrenzdruck auf die folgende Hauptkultur ausüben. Daher muss eine aktive Bestandsreduktion vor Etablierung der Nachfrucht erfolgen. Diese kann mechanisch, chemisch oder durch Beweidung bzw. Schnittnutzung erfolgen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass es eine große Variabilität in der Zwischenfruchtplatzierung innerhalb der Fruchtfolge gibt. Es gilt betriebsindividuell nach Standort, Fruchtfolge und Maschinenausstattung zu entscheiden.



Abb. 2-4: Walzen eines Zwischenfruchtbestands bei Frost.

3. Wie lassen sich Vorteile mehrerer Pflanzenarten in Zwischenfruchtmischungen nutzen?

Robin Kümmerer

Mit dem Anbau von Zwischenfrüchten werden vielfältige agronomische, ökologische und auch gesellschaftliche Ziele verfolgt. In den vorangegangenen Kapiteln wurde beschrieben, wie unterschiedlich die Eigenschaften der verschiedenen Pflanzenarten sind, die als Zwischenfrüchte in Betracht kommen. Um die Funktionen von Zwischenfrüchten zu erweitern und ihre Stabilität zu erhöhen, wird die Kombination verschiedener Arten mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften in Zwischenfruchtmischungen vorgeschlagen und auch in der Praxis angewandt^{19,20}. Artenreiche Zwischenfruchtmischungen rückten ab den 2000er Jahren zunehmend in den Fokus der Wissenschaft, fanden aber erst mit der GAP 2013 und der Einführung der ökologischen Vorrangflächen den Weg in die breite Praxis. Die Bandbreite der Artenvielfalt in den angebauten Zwischenfruchtmischungen reicht dabei von 2 Arten, womit gerade die „Greening“-Vorgaben erfüllt werden bis zu mehr als 10 verschiedenen Arten, nach der Maxime „je diverser, desto besser“. Die Agrarpolitik förderte die Artenvielfalt in Zwischenfruchtmischungen durch Vorgaben, wie

beispielsweise beim „Greening“ aber auch durch direkte Zahlungen für vielfältige Zwischenfruchtmischungen, wie es in einigen Länderprogrammen der Fall ist. Während die Vorteile des Zwischenfruchtanbaus allgemein bereits gut in der wissenschaftlichen Literatur dokumentiert sind, sind diese im Speziellen für den Anbau von diversen Artenmischungen bisher nicht eindeutig und klar festgehalten²¹. Die Idee, dass Artenreichtum die Funktionen von Zwischenfrüchten verbessert, hat ihre Wurzeln in ökologischen Theorien. Diese besagen, dass sich Arten aufgrund ihrer unterschiedlichen Ansprüche an Wachstumsfaktoren wie Nährstoffe, Wasser, Licht und Wärme und ihrer unterschiedlichen Anpassungsfähigkeiten an die gegebenen Wachstumsfaktoren in Mischungen ergänzen und vorhandene Ressourcen besser ausnutzen als Reinsaat²². Die folglich erhöhte Nährstoffaufnahme verbessert das Wachstum der Zwischenfrüchte. Durch die erhöhten Einträge von Nährstoffen und organischer Substanz in den Boden soll auch die Bodenbiologie stimuliert werden^{23,109,110,111}. Da Pflanzenarten unterschiedliche Strate-

gien entwickelt haben, um mit anderen Arten in Konkurrenz zu treten und gleichzeitig jede Art zumindest teilweise eine eigene Nische besetzt, soll auch die Unkrautunterdrückungsleistung von Zwischenfrüchten vom Artenreichtum profitieren^{24,112-115}. Unterschiedliche artspezifische Umweltansprüche sollen die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass zumindest eine Art unter den vorherrschenden Bedingungen etabliert werden kann^{25,116-118}. Die genannten positiven Effekte, die sich durch den Anbau von artenreichen Zwischenfruchtmischungen ergeben, müssten zusammengenommen nicht nur zu besseren Leistungen der Zwischenfrucht, sondern auch zu erhöhten Erträgen der Folgekultur führen. Diese hohen Erwartungen an artenreiche Zwischenfruchtmischungen werden nach den Ergebnissen des CATCHY-Projekts und auch derer anderer Studien jedoch nicht immer eindeutig erfüllt^{21,26}. Bei der Sprossbiomasse von Mischungen wurde nur in wenigen Fällen ein statistisch absicherbarer Synergieeffekt im Vergleich zu Reinsaaten gemessen. Bei Mischungen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen trat der Effekt häufiger auf als bei Mischungen aus Nicht-Leguminosen. In einige Fällen brachte erst eine Optimierung der Mischungsverhältnisse eine verbesserte Biomasseleistung der Zwischenfruchtmischungen. Die oberirdische Biomasseleistung steht zwar mit vielen wichtigen Funktionen einer Zwischenfrucht in Zusammenhang, ist aber nicht das alleinige Bewertungskriterium für die Gesamtleistung. Weitere wichtige Aspekte wie die Wurzelleistung verschiedener Zwischenfrüchte, der Effekt auf den Nährstoffhaushalt oder das Mikrobiom im Boden werden in den folgenden Kapiteln besprochen.

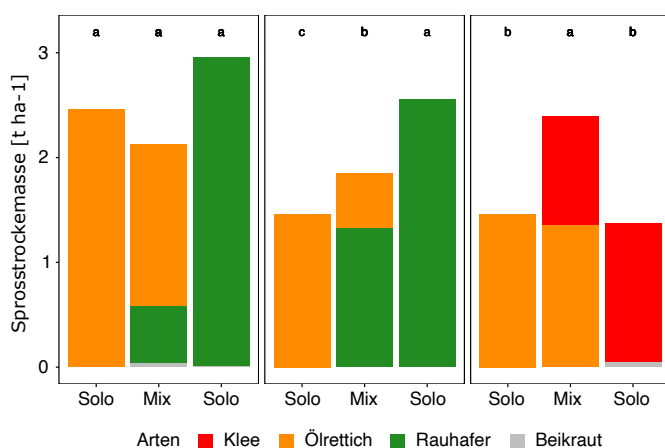


Abb. 3-1: Beispiele für Sprosstrockenmasseerträge von Reinsaaten verschiedener Arten und daraus kombinierter Zweiermischungen aus unterschiedlichen Jahren und Standorten. Die Kombination zweier Arten zu einer Zwischenfruchtmischung kann einen antagonistischen (links), einen additiven (mitte) oder einen synergistischen (rechts) Effekt hervorrufen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede.

Dass die Erwartungen, aus den ökologischen Theorien hervorgehen nicht immer getroffen werden, kann zunächst daran liegen, dass sich diese Theorien hauptsächlich auf natürliche- oder Grünland Ökosysteme stützen, die im Gegensatz zu Ackerbausystemen keine oder nur geringe Eingriffe erfahren und somit der natürlichen Sukzession unterliegen²⁷. In ackerbaulichen Systemen erfolgt in der Regel jährlich ein Wechsel der Kultur sowie Bodenbearbeitungs-, Dünge- und Pflegemaßnahmen. Das Wachstum von Zwischenfrüchten ist oft auf nur wenige Wochen begrenzt, was die Vergleichbarkeit mit Erkenntnissen aus natürlichen Ökosystemen schwierig macht. Beim Anbau von Zwischenfrüchten in intensiv genutzten Ackerbausystemen liegen im Gegensatz zu natürlichen Ökosystemen oft keine Nährstofflimitierungen vor, weil nach der Ernte der Hauptfrucht Nährstoffüberschüsse bestehen, ein hohes Mineralisationspotenzial der Böden vorliegt oder eine Düngung mit Wirtschaftsdüngern erfolgt. Häufig übersteigt diese Menge an Nährstoffen das Aufnahmevermögen der Zwischenfrüchte. Das Nährstoffaufnahmevermögen der Zwischenfrüchte kann zudem durch andere Faktoren wie geringe Wasserverfügbarkeit oder eine zu kurze Vegetationszeit beschränkt sein. Die Ergebnisse unserer Feldversuche zeigen, dass der Anbau von Zwischenfruchtmischungen unter den zuvor genannten Bedingungen weniger Vorteile bringt als unter nährstofflimitierten Bedingungen, wie sie in natürlichen Ökosystemen vorherrschen. In der Praxis können limitierte Nährstoffangebote beispielsweise durch Einschränkungen im Düngerecht, in Trockenzeiten oder auf Grenzstandorten vorliegen.

Zu den Nachteilen von Zwischenfruchtmischungen gehören neben den meist höheren Saatgutkosten, erhöhte Anforderungen an die Sätechnik aufgrund unterschiedlicher Samengrößen und auch erhöhte Anforderungen an das Management, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher optimaler Saatzeitpunkte oder unterschiedlichem Abfrierverhaltens verschiedener Arten. Artenreiche Mischungen sind daher nicht per se besser als Reinsaaten für den Zwischenfruchtanbau geeignet. Dennoch gibt es sinnvolle Gründe, Zwischenfruchtmischungen den Reinsaaten vorzuziehen. Zwischenfrüchte sollten immer dann als Mischung verschiedener Arten angebaut werden, wenn sie die geforderten Funktionen besser erfüllen als eine bestimmte Art in Reinsaat und die Vorteile von Mischungen deren Nachteile überwiegen. Damit dies gelingen kann gibt es aus pflanzenbaulicher Sicht einige Punkte zu beachten.

Zunächst sind Arten unterschiedlich an Standorte angepasst und deshalb muss eine Zwischenfruchtmischung, die an einem Standort funktioniert, nicht zwingend auch an einem anderen Standort erfolgreich sein. Dazu kommt, dass Pflanzen, die in einer Gesellschaft wachsen, miteinander interagieren. Dem geeigneten Pflanzenbauer kommt dabei wahrscheinlich als erstes der Wettbewerb von Pflanzen um Nährstoffe, Licht und Wasser in den Sinn. In Beständen, die nur aus einer Kulturpflanzenart bestehen, ist diese Art von Interaktion relativ einfach zu kalkulieren, vorausgesetzt für jede Pflanze eines Bestandes wurden annähernd gleiche Bedingungen geschaffen. Über die Wahl der Aussaatstärke kann für jeden Standort eine Bestandsdichte etabliert werden, die das optimale Verhältnis zwischen Einzelpflanzenenertrag und Konkurrenz darstellt, und damit den Gesamtertrag eines Bestandes maximiert. In Zwischenfruchtmischungen stellt sich dies

nicht so einfach dar, denn zum einen fehlen oft Informationen über die optimale Aussaatstärke einzelner Arten, die abhängig vom Standort und vom Aussaatzeitpunkt variiert. Zum anderen reagieren Pflanzen verschiedener Arten oft völlig anders aufeinander als Pflanzen derselben Art. Man spricht hierbei von interspezifischer Interaktion. Diese kann sich als Konkurrenz äußern, aber auch synergistischer Natur sein, wenn zum Beispiel Nährstoffe in unterschiedlicher Menge und auf unterschiedliche Art und Weise aus dem Boden aufgenommen werden und sich somit die pflanzenverfügbare Nährstoffmenge erhöht oder Nährstoffe direkt zwischen den Pflanzen ausgetauscht werden. Im Folgenden wird ein Schema dargestellt um betriebs- und standortangepasste Zwischenfruchtmischungen sinnvoll zusammenzustellen oder kommerziell erhältliche Mischungen zu bewerten.



Abb. 3-2: Schematische Vorgehensweise für die Erstellung von Zwischenfruchtmischungen.

1. Ziele festlegen

Zu Beginn müssen Ziele definiert werden, die mit dem Zwischenfruchtbau verfolgt werden sollen. In der Regel wird es sich dabei um mehrere Ziele handeln, weshalb auch eine Priorisierung der Aufgaben einer Zwischenfruchtmischung erfolgen sollte. Die Ziele sollten individuell an die auf dem jeweiligen Betrieb vorliegenden Bedingungen angepasst sein und sich beispielsweise nach der Wirtschaftsform, Fruchtfolgen, Vor- und Nachfrucht oder Bodenbearbeitungssystemen richten.

2. Arten auswählen

Im zweiten Schritt werden aus dem großen Pool der für den Zwischenfruchtbau zur Verfügung stehenden Arten jene ausgewählt, die grundsätzlich für die angestrebte Zwischenfruchtmischung in Frage kommen. Neben der Artenwahl kann auch noch die Auswahl spezieller Sorten ins Auge gefasst werden. Die Auswahl in Frage kommender Arten wird oft schon durch den Anbau bestimmter Hauptkulturen in

der Fruchtfolge stark eingegrenzt. Hier gilt es, darauf zu achten, dass die Vermehrungszyklen von Pathogenen, wie zum Beispiel dem Erreger der Kohlhernie in Rapsfruchtfolgen, durch die Zwischenfrucht unterbrochen werden. Sicherlich spielen hierbei auch der Ausgangsbefall und die Anbaupausen der anfälligen Kulturen eine Rolle. Selbstverständlich ist bei der Auswahl der Arten auch darauf zu achten, dass diese unter den vorherrschenden Standortbedingungen in der Lage sind, die angestrebten Ziele zu erreichen. Das bedeutet, dass die in Frage kommenden Arten die geforderten Aufgaben wie zum Beispiel Nährstoffkonservierung, Nematodenbekämpfung, Stickstoff-Fixierung, Futtereignung oder die Stabilisierung der Bodenstruktur erfüllen können müssen. Neben diesen speziellen Aufgaben müssen auch allgemeine ackerbauliche Anforderungen grundsätzlich durch die in der angestrebten Mischung enthaltenen Arten erfüllt werden können. Dazu gehört neben einer schnellen und ausreichenden Bodenbedeckung, um

Erosion vorzubeugen und Schattengare zu fördern, eine sichere und ausreichende Unterdrückung von Unkräutern, Ungräsern aber auch Ausfallpflanzen, um die ungewollte Vermehrung von Pathogenen zu vermeiden. Nicht jede der ausgewählten Arten muss alle Ziele erfüllen können, aber jede Aufgabe muss zumindest durch eine der in der angestrebten Mischung enthaltenen Arten erfüllt werden können. Bereits bei der Auswahl der in Frage kommenden Arten sollten auch die Ansprüche der folgenden Hauptkultur berücksichtigt werden. Die Gewährleistung einer sicheren Abtötung des Zwischenfruchtbestandes sollte berücksichtigt werden, um die Konkurrenz durch eine „durchgewachsene“ Zwischenfrucht zu verhindern. Ebenso sollte darauf geachtet werden, dass die Herstellung eines geeigneten Saatbettes für die Folgekultur nicht durch die Zwischenfrucht behindert wird, wie es beispielsweise beim Verbleib von sehr hohen Mengen an Zwischenfruchtrückständen der Fall sein kann. Nicht abgefrorene Sprossmasse oder ein dichter Wurzelfilz in Kombination mit engen Zeitfenstern für die Saatbettbereitung können hier Probleme bereiten.

Nicht zuletzt ist vor allem in Trockengebieten bereits bei der Auswahl der Arten darauf zu achten, dass es nicht zu einer Wasserkonkurrenz mit der Hauptfrucht kommt. Alle ausgewählten Arten müssen grundsätzlich mit den Bedingungen des Standortes und auch der möglichen Variabilität der Witterungsbedingungen zurechtkommen, die zum Zeitpunkt der geplanten Aussaat vorherrschen können. Dabei gilt es auch zu beachten, dass sich Arten wie beispielsweise Gelbsenf ausschließlich für eine Spätsaat eignen, während beispielsweise einige Leguminosen nur für frühere Aussaattermine geeignet sind. Aus ökonomischer Sicht muss schließlich auch die Kosten-Nutzen-Relation für das Saatgut der gewählten Arten passen.

3. Arten kombinieren

Bei diesem Schritt geht es darum, Arten aus der zuvor erstellten Auswahl in Mischungen so zusammenzustellen, dass die Ziele und deren Priorisierung bestmöglich eingehalten werden können. Hierbei gibt es Hilfestellungen, an denen man sich orientieren kann, aber auch einige kritische Punkte, die auf jeden Fall beachtet werden sollten. Eine gelungene Kombination von Arten in einer Mischung ergibt sich, wenn die Interaktion, die zu negativen Effekten führt,

vermieden wird und Interaktion, die zu positiven Effekten führt, ermöglicht wird. Dies gilt sowohl für den oberirdischen Aufwuchs, wie auch für das Wurzelsystem einer Zwischenfrucht. Negative Interaktion wird zum Beispiel sichtbar, wenn das Konkurrenzverhalten innerhalb einer oder zwischen verschiedenen Arten dazu führt, dass die generative Entwicklung der Pflanzen beschleunigt wird (Abb. 3-3). Dies hat zur Folge, dass nur wenig vegetative Sprossmasse gebildet wird, diese schnell verholzt und das Wurzelwachstum früh eingestellt wird. Positive Interaktion entsteht, wenn Arten durch die Konkurrenz beispielsweise auf unterschiedliche Ressourcenquellen zurückgreifen. In Mischungen wird eine Leguminose zum Beispiel durch die Konkurrenz einer Nichtleguminose um den Nährstoff Stickstoff dazu gezwungen, Stickstoff mit Hilfe der Knöllchenbakterien aus der Luft zu fixieren (Abb. 3-2). Oder bestimmte Pflanzen wie Buchweizen mobilisieren den Nährstoff Phosphor, wenn die gelöste Form durch andere Pflanzen in Anspruch genommen wird. Um die Wahrscheinlichkeit von negativen Interaktionen zu verringern und die von positiven Interaktionen zu erhöhen, sollte darauf geachtet werden, dass möglichst unterschiedliche Arten in einer Mischung kombiniert werden. Dies kann beispielsweise erreicht werden, indem Mischungspartner aus verschiedenen Pflanzenfamilien eingesetzt werden (z. B. Kreuzblütler, Gräser, Korbblütler oder Schmetterlingsblütler). Zudem sollte sich die Kombination von Arten mit verschiedenen Wuchsformen positiv auf die Gesamtbiomasse der Mischung auswirken. Im Bereich der Wurzel können das tief-, flach-, fein-, und grobwurzelnde Arten sein, die ein Pfahl- oder ein Büschelwurzelsystem ausbilden. Im Sprossbereich lassen sich Arten kombinieren, die verschiedene Etagen eines Bestandes in Anspruch nehmen oder stützende und rankende Wuchsformen mit sich bringen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die damit geschaffene Raumteilung über alle Phasen des Wachstums annähernd gleichmäßig verteilt bleibt, um eine Spätverunkrautung zu vermeiden, wenn bestimmte Räume im Bestand frei werden. Alle Arten, die zu einer Mischung kombiniert werden, sollten ähnliche Ansprüche an den Aussaatzeitpunkt haben, aber in dieser Hinsicht auch eine gewisse Flexibilität mit sich bringen, da nicht genau vorherzusehen ist, wie wüchsig die Bedingungen während der Wachstumsperiode tatsächlich sind. Die

auf einem Betrieb vorhandene Sätechnik bestimmt ebenfalls mit, welche Arten kombiniert werden können. So sollte eine Entmischung im Saatgutbehälter verhindert werden und auch die Ansprüche auf verschiedene Ablagetiefen bei der Saat beachtet werden.

4. Samenanteile bestimmen

Nachdem die Arten ausgewählt und kombiniert wurden, stellt sich die Frage nach dem optimalen Verhältnis der Arten innerhalb der Mischung. Um die Zusammensetzung der Saatgutmischung festzulegen, wird oft nach dem Prinzip vorgegangen, die übliche Aussaatstärke der jeweiligen Art durch die Anzahl der enthaltenen Mischungspartner zu teilen. Mit dieser Methode werden jedoch selten die optimalen Mischungsverhältnisse erreicht und es kommt dabei oft dazu, dass konkurrenzstarke Arten die Mischung dominieren, während konkurrenzschwache Arten nicht zur Geltung kommen. Um dies zu verhindern, sollte das Konkurrenzvermögen der jeweiligen Arten berücksichtigt werden. Kruziferen besitzen zum Beispiel meist ein hohes Konkurrenzvermögen, während Leguminosen oft ein geringes Konkurrenzvermögen aufweisen. Das Konkurrenzvermögen ist dabei auch von den Umweltbedingungen abhängig. Das Konkurrenzvermögen von Leguminosen erhöht sich beispielsweise unter stickstofflimitierten Bedingungen deutlich. Auch die artspezifische Elastizität der Bestandesdichte-Biomasse-Beziehung muss berücksichtigt werden: eine Halbierung der Saatstärke führt nicht zwingend zu einer Halbierung der Biomasse. Grundsätzlich sollten Arten, die auch als Reinsaat gut funktionieren, als Hauptbestandsbildner eingesetzt werden. Arten, die als Reinsaat weniger erfolgreich sind, wie zum Beispiel Kleearten, sollten jedoch als Unterstützung der Hauptbestandsbildner nicht unterschätzt werden. Die Priorisierung der speziellen Ziele, die mit der Zwischenfruchtmischung verfolgt werden, spielen bei den Artenverhältnissen in der Mischung ebenfalls eine wichtige Rolle. Wird zum Beispiel die Stickstofffixierung höher priorisiert als die Aufnahme von im Boden gelöstem Stickstoff sollte der Leguminosenanteil in der Mischung erhöht werden. Dies sollte jedoch nur so weit erfolgen, dass dabei die Einhaltung der allgemeinen ackerbaulichen Anforderungen nicht beeinträchtigt wird. Die Festlegung der Gesamtaussaatstärke kann grob am Mittelwert der üblichen Aussaatstärke der beteiligten Arten orien-

tiert werden. Aufgrund der potenziellen Ressourcenkomplementarität und Nischendifferenzierung ist jedoch davon auszugehen, dass sich eine Erhöhung der Gesamtaussaatstärke positiv auswirkt. Um den Zwischenfruchtanbau wirtschaftlich zu gestalten, spielen schließlich auch bei der Mischungszusammensetzung die Saatgutkosten eine wichtige Rolle.

5. Zwischenfruchtmischung im Feld beobachten und bewerten

Nachdem die Zwischenfruchtmischung erstellt und ausgesät wurde, gilt es den heranwachsenden Bestand im Feld zu beobachten und zu bewerten, ob die Ziele in der gewünschten Priorisierung erreicht wurden. Gegebenenfalls sind Änderungen an der Mischung vorzunehmen, um den Anbau im nächsten Jahr weiter zu optimieren.



Abb. 3-3: Phacelia in Mischung mit Ölrettich (links) zeigt Aufhellungen und verminderten Wuchs, durch Stickstoffmangel induziert. Phacelia in Mischung mit Alexandrineklee (rechts) zeigt keine Mangelsymptome.



Abb. 3-4: Ölrettich in Reinsaat stängelnd aufgrund der hohen intraspezifischen Konkurrenz auf und beginnt zu blühen (rechts), während die gleiche Sorte bei gleichem Aussaatstermin in einer Mischung mit Phacelia, Alexandrineklee und Ramtillkraut aufgrund geringerer Konkurrenz vegetativ bleibt.

KURZ GELESEN

- Zwischenfruchtmischungen können agronomische, ökologische und gesellschaftliche Vorteile bieten.
- Die Kombination unterschiedlicher Arten in Mischungen kann die Funktionen von Zwischenfrüchten erweitern und ihre Stabilität erhöhen.
- Unterschiede zwischen Ackerbausystemen und natürlichen Ökosystemen erschweren die Anwendung ökologischer Theorien auf Zwischenfruchtmischungen.
- Artenreiche Zwischenfruchtmischungen können Vorteile wie verbesserte Nährstoffaufnahme, Stimulierung der Bodenbiologie und Unkrautunterdrückung bieten.
- Es besteht jedoch kein zwingender Zusammenhang zwischen dem Artenreichtum von Zwischenfrüchten und ihren Ökosystemleistungen.
- Eine Vorgehensweise zur Auswahl und Bewertung von Zwischenfruchtmischungen wird vorgestellt.
- Die Auswahl von Arten in Zwischenfruchtmischungen sollte an die Ziele und Bedingungen des Betriebs angepasst werden und die Anforderungen der folgenden Hauptkultur berücksichtigen.

Infobox 3-1.

4. Wie Zwischenfrüchte die Bodenstruktur und -qualität beeinflussen

Norman Gentsch, Georg Guggenberger

4.1 HUMUSAUFBAU UND KOHLENSTOFF IM BODEN

Die organische Bodensubstanz, weitläufig auch als Humus bezeichnet, ist ein wichtiger Indikator für den Zustand und die Qualität des Bodens. Alle bodenbiologischen Prozesse hängen von Verfügbarkeit und Menge der organischen Substanz im Boden ab. Weil Humus zu etwa 58 % aus organischem Kohlenstoff (C_{org}) besteht, dient dieser als Indikator für die Messung des Humusgehalts. Die Gehalte an C_{org} werden im Labor ermittelt und durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72 in organische Bodensubstanz oder Humus umgerechnet (Infobox 4-1).

Zwischenfrüchte führen langfristig zu einer Erhöhung des Humusvorrats. Zu diesem Ergebnis, kommt eine im Rahmen des Projekts durchgeführte Literaturrecherche über etwa 2000 Datenpunkten aus wissenschaftliche Arbeiten weltweit. Im globalen Mittel lässt sich eine jährliche C_{org} Anreicherung von $0,49 \text{ t pro ha (t ha}^{-1} \text{ a}^{-1})$ durch Zwischenfruchtanbau berechnen (96 % Konfidenzintervall, $0,34 \text{ bis } 0,65 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Das entspricht einer Humusakkumulationsrate von etwa $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einem CO_2 -Äquivalent von $1,82 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Humusbildung ist jedoch kein unendlicher Prozess, denn irgendwann stellt sich für

jeden Boden ein standorttypischer Zustand ein, bei dem sich die Gewinne und Verluste an C_{org} die Waage halten. Die Humusbildung verläuft also nicht linear, sondern verlangsamt sich mit der Zeit, bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist (Abb. 4-1). Wie viel Humus letztendlich durch Zwischenfruchtanbau aufgebaut werden kann, lässt sich daher aktuell nur über statistische Modelle abbilden. In einer umfangreichen Literaturstudie über verschiedene Agrarökosysteme wird die Zeitspanne bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes des C_{org} -Gehaltes im Boden durch intensiven Zwischenfruchtanbau auf 155 Jahre geschätzt²⁸. Projektionen zeigen, dass im Mittel $16,7 \text{ t ha}^{-1} C_{org}$ durch langfristigen Zwischenfruchtanbau im Boden gespeichert werden könnten. Für den Standort Asendorf zeigen Modellrechnungen im Rahmen des CATCHY-Projekts, dass sich ebenfalls nach etwa 150 Jahren ein neues Gleichgewicht einstellt (Abb. 4-1). Insgesamt ließe sich über diesen Zeitraum am Standort der mittlere C_{org} -Vorrat im Oberboden (0-30 cm) um $11,9 \text{ t ha}^{-1}$ steigern (von $71,0 \text{ t ha}^{-1}$ auf $82,9 \text{ t ha}^{-1}$). Die Daten passen sehr gut zu den durch Poeplau und Don²⁸ ermittelten globalen Werten und verdeutlichen die Relevanz von Zwischenfrüchten für den Humushaushalt der Böden.

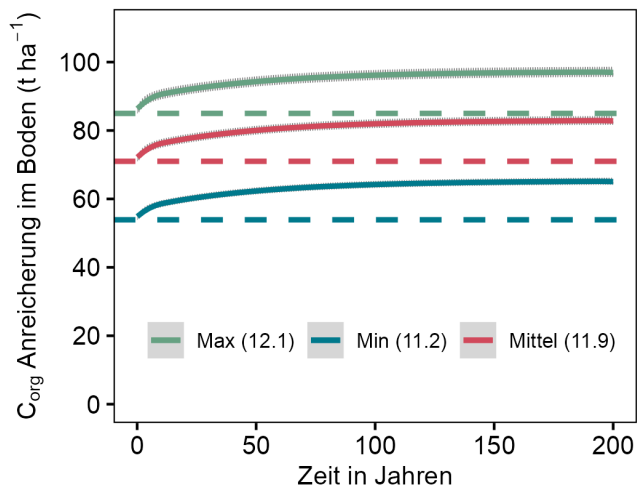


Abb. 4-1: Modellierung der C_{org} -Anreicherung im Oberboden (0-30 cm) durch Zwischenfruchtanbau in einer Winterweizen - Mais Fruchtfolge am Standort Asendorf. Die gestrichelten Linien geben den initialen C_{org} -Vorrat des Bodens im Gleichgewichtszustand ohne Zwischenfruchtanbau an. Die Linearität des Gleichgewichtszustandes ist jedoch eine Annahme und verläuft tatsächlich unter zyklischen Schwankungen. Farben beschreiben drei unterschiedliche Modelle für maximale, mittlere und minimale C_{org} -Vorräte der Versuchsfläche. Die Kurven geben den Verlauf der C_{org} -Anreicherung im Boden bis zum Erreichen des neuen Gleichgewichts an (RothC Modell). Der Gesamtzuwachs nach 200 Jahren ist in Klammern angegeben (in $t\ ha^{-1}$).

Die aktuelle Datenlage zum Humusaufbau durch Zwischenfrüchte muss jedoch auch kritisch betrachtet werden. Laut einer neuen Studie existieren zu wenig geeignete Studien, um die Rolle von Zwischenfrüchten für Humusaufbau und C_{org} Sequestrierung verlässlich zu beschreiben²⁹. Keine der existierenden Studien analysierte Proben aus tieferen Bodenhorizonten (>30 cm) und berücksichtigten Unterschiede auf der Grundlage der äquivalenten Bodenmasse. Die Abschließende C_{org} Inventur auf den CATCHY Flächen bis 90 cm Bodentiefe ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch in Arbeit. Darin werden Unterschiede der Bodendichte wie auch Veränderungen der äquivalenten Bodenmasse durch Bodenbearbeitung berücksichtigt. Die Auswertung und Bereitstellung der Daten wird jedoch an andere Stelle erfolgen.

Kurzfristige Änderungen des Humusgehalts im Boden lassen sich nur sehr schwer messen. Auch die prognostizierte Humusaufbaurrate von $1\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ bewirkt am Standort Asendorf am Rechenbeispiel in Infobox 4-1 nur eine Steigerung des C_{org} -Gehaltes im Oberboden von 1,40 % auf 1,41 %. Dieser sehr geringe Unterschied von 0,01 % lässt sich messtechnisch nicht verlässlich erfassen. Um den jährlichen Einfluss von Zwischenfrüchten auf den C_{org} -Gehalt der Böden dennoch messbar zu machen, wurde am Standort Asendorf mit einem stabilen Kohlenstoff-Isotope zur Markierung der Zwischenfruchtbiomasse

gearbeitet (das methodische Prinzip ist in Infobox 6-2 für Stickstoffisotope dargestellt). Mit Hilfe dieser Technik konnten kurzfristige Veränderungen des Bodenkohlenstoffs, die während der Zersetzung der Zwischenfrucht stattfinden, gemessen werden. Abb. 4-1 zeigt, dass bereits unmittelbar nach dem Absterben der Zwischenfrucht im Dezember ein C_{org} -Eintrag in den Boden beginnt. Bodenorganismen zersetzen auch bei niedrigen Temperaturen im Winter die Zwischenfruchtstreu und bilden dabei stabile Humusverbindungen. Alle untersuchten Zwischenfrüchte zeigen einen deutlich erhöhten C_{org} -Eintrag in den Boden im Vergleich zur Brache. Es bestehen jedoch auch unterschiedliche Potenziale der Varianten. Die höchsten Transferraten in den Boden zeigt die 12er Mischung (Abbildung 4-2) gefolgt von Phacelia und Rauhafer. Die niedrigsten C_{org} -Einträge werden von Senf und der 4er Mischung erreicht. Das Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) Verhältnis ist hier ein wichtiger Faktor für die effiziente Umsetzung der Zwischenfruchtstreu. Die 12er Mischung weist ein enges C/N Verhältnis von Durchschnittlich etwa 15 in der Sprossmasse auf (Tabelle 6-1). Erreicht wird dies durch Kombination von Pflanzen mit engen und weiten C/N Verhältnissen. Dies begünstigt mikrobielle Prozesse und führt zu einer effektiven Humusanreicherung im Boden (Näheres dazu in Kapitel 5 unter: Effiziente Stickstoffversorgung durch Mikroorganismen).

Für den Humusaufbau ist der Zwischenfruchtanbau ein unverzichtbares Mittel. Langfristig lässt sich damit nicht nur die Bodenfruchtbarkeit verbessern, sondern auch Kohlenstoff in den Boden als stabile Humusverbindungen einlagern. Damit ist der Zwischenfruchtanbau eine klima-relevante Maßnahme, die einen Teil des Ausstoßes von Treibhausgasen aus der landwirtschaftlichen Produktion kompensieren kann.

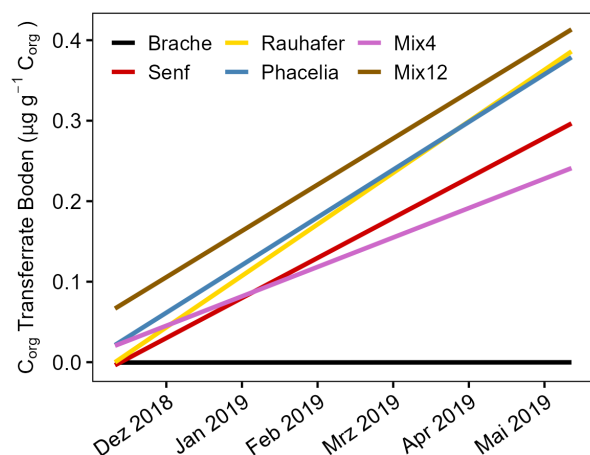


Abb. 4-2: Transferrate von C_{org} aus der Zwischenfruchtstreu in den Boden. Die Daten wurden mit Hilfe stabiler Kohlenstoffisotope bestimmt und repräsentieren kurzfristige Änderungen des Boden- C_{org} Pools im Verlauf der Zersetzung von Zwischenfruchtstreu.

GEHALT ODER VORRAT? - ES IST WICHTIG PRÄZISE ZU SEIN.

Im Zusammenhang mit der Humusbildung werden häufig verschiedene Begriffe wie "Humusvorrat", "Humuskonzentration" oder "Humusgehalt" verwendet, die jedoch unterschiedlich definiert sind. Wie anfangs beschrieben bezeichnet Humus die Gesamtheit der organischen Substanz im Boden. Gemessen wird jedoch der Kohlenstoff im Boden, genauer gesagt der organische Kohlenstoff (C_{org}). Neben C_{org} -Verbindungen kommen im Boden auch anorganische Kohlenstoff (C_{anorg}) Verbindungen vor. Hauptsächlich stammen diese aus carbonatreichen Gesteinen, Sedimenten oder der Kalkdüngung. Um den Kohlenstoffgehalt zu messen wird eine Bodenprobe bei hohen Temperaturen verbrannt und das frei werdende CO_2 gemessen. Damit erhält man die Konzentration des Gesamtkohlenstoffs (C_{ges}) inklusive des anorganischen Kohlenstoffs. Sollten die Böden Carbonate enthalten, muss dieses vom Gesamt-Kohlenstoff abgezogen werden:

$$C_{org}(\%) = C_{ges}(\%) - C_{anorg}(\%)$$

Der Begriff „Gehalt“ umfasst also eine Konzentrationsangabe, die entweder in $mg\ g^{-1}$ Boden oder dividiert durch 10 in % angegeben wird.

Der Begriff „Vorrat“ beinhaltet das spezifische Volumen der einzelnen Bodenhorizonte und die Summe der Horizonte bis zu einer bestimmten Bodentiefe. Für einen spezifischen Bodenhorizont berechnet sich der C_{org} -Vorrat aus:

$$C_{org}Vorrat\ (t\ ha^{-1}) = BD(g\ cm^{-3}) \times C_{org}(\%) \times Tiefe\ (cm)$$

Proben zur Bestimmung der Bodendichte (BD) werden mit Stechzylindern aus jedem Horizont entnommen (meist $100\ cm^3$) und im Labor bei $105^\circ C$ getrocknet. In der untenstehenden Tabelle ist ein Beispiel zur Berechnung des C_{org} -Vorrats in einem Profil am Standort Asendorf gegeben. Die Summe der drei Horizonte bis 90 cm Bodentiefe ergibt $71,3\ t\ C_{org}\ ha^{-1}$. Multipliziert mit dem Faktor 2 ergibt sich ein Humusvorrat von $142,6\ t\ ha^{-1}$. Oftmals wird auch der so genannte "Van Bemmelen Faktor" von 1.724 verwendet. Die Angabe der Tiefe ist daher sehr wichtig, wenn über Vorräte gesprochen oder Standorte miteinander verglichen werden sollen.

HORIZONT	TIEFE (CM)	BD (G CM^{-3})	C_{ORG} - GEHALT (%)	C_{ORG} - VORRAT (T HA^{-1})
Ap	30	1.3	1.4	55.6
Bv	30	1.5	0.8	12.7
Cv	30	1.6	0.2	2.9
Summe bis	90			71.3

Infobox 4-1.

4.2 MINDERUNG VON AUSWASCHUNGSVERLUSTEN UND NÄHRSTOFFHAUSHALT

Eine der wichtigsten Aufgaben des Zwischenfruchtanbaus ist die Minderung von Nährstoffverlusten aus Agrarökosystemen. Ziel ist es, Restnährstoffe im Boden, welche die Vorfrucht nicht aufnehmen konnte bzw. bei deren Zersetzung frei werden, in der Zwischenfruchtbiomasse zu speichern und für folgende Kulturen wieder verfügbar zu machen. Wenn auch Nährstoffverluste durch Zwischenfruchtanbau nicht vollständig vermieden werden können,

so werden dennoch sehr enge Nährstoffkreisläufe erreicht.

Als mobile Nährstoffe sind vor allem Nitrat (NO_3^-) und Phosphate von Auswaschungsverlusten mit dem Sickerwasser betroffen. Hohe Nitrat- oder Phosphatfrachten fallen entweder als Nährstoffüberhang der Vorkultur, Düngung zu ungünstigen Zeitpunkten oder durch verstärkte Mineralisation von Ernteresten an. Besonders letzteres kann vor allem im Herbst zu hohen Nährstofffrachten führen. Dabei werden Erntereste (Stroh, Stoppeln, Wurzeln) bei feuchter Witterung und

noch immer hohen Bodentemperaturen schnell mineralisiert. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt am Beispiel der Brache in Abb. 4-2. Die Herbstmineralisation zwischen September und November wird hier als grün-gelbe Wolke veranschaulicht. Nach der Ernte wurde ein hoher Stickstoff-Überhang von 50 kg ha^{-1} gemessen. Die Herbstmineralisation erhöhte die $N_{\min}$ -Werte im Boden auf 120 kg N ha^{-1} . Einsetzende Winterniederschläge verlagerten den Stickstoff in den Unterboden, erkennbar an der Erhöhung der $N_{\min}$ -Konzentrationen in 80 cm Bodentiefe. Insgesamt berechnete sich die $N_{\min}$ -Verlagerung bis zur Maisausaat unter 80 cm auf 102 kg ha^{-1} . In diesen Tiefen stehen die Nährstoffe den jungen Pflanzen nicht zur Verfügung und sind somit potenziell der Auswaschung preisgegeben. Zwischenfrüchte kompensieren die hohen Stickstofffrachten im Boden und wirken so Nährstoffverlusten entgegen. In Abb. 4-3 ist der Verlauf der $N_{\min}$ -Gehalte im Boden über einen Zeitraum von zehn Monaten während und nach der Vegetation verschiedener Zwischenfrüchte dargestellt. Gut ersichtlich nehmen die Zwischenfrüchte im Herbst Restnährstoffe auf und kompensieren die Herbstmineralisation. Daher kommt es unter Zwischenfrüchten nicht zu solch hohen $N_{\min}$ -Konzentrationen wie unter der Brache (Vergleich Abb. 4-3 und Abb. 4-2). Einzig Klee in Reinsaat ist nicht ausreichend geeignet, hohe Stickstofffrachten zu puffern. Im Versuch erreichte Alexandrinerklee als Zwischenfrucht nur die Hälfte der Biomasse der Vergleichsvarianten und bediente sich außerdem mithilfe der Knöllchenbakterien am atmosphärischen Stickstoff. Im Versuch aus Abb. 4-3 erfolgte die Abtötung mechanisch zum Zeitpunkt des ersten Frostes Anfang November, um einen einheitlichen Zeitpunkt für die Bodenanalysen zu erhalten. Bei späteren Zeitpunkten der Abtötung oder frostharten Zwischenfrüchten ergeben sich entsprechend

verschobene Startpunkte der Mineralisation. Nach dem Absterben der Zwischenfrucht (gepunktete Linie in Abb. 4-3) beginnt die sofortige Mineralisation der Zwischenfruchtstreu. Besonders bei Senf und Klee aber auch bei den Mischungen führt die Mineralisierung stickstoffreicher Blattmasse zur Erhöhung der $N_{\min}$ -Konzentrationen im Oberboden. Genau wie unter der Brache ist der frisch mineralisierte Stickstoff aus der Zwischenfruchtbiomasse über den Winter Verlagerungsprozessen im Boden ausgesetzt. Die $N_{\min}$ -Mengen, die bis zur Maisausaat aus dem Wurzelraum ($> 80 \text{ cm}$) ausgewaschen wurden, sind in Abb. 4-3 rot markiert. Rauhafer, Phacelia und die 12er Mischung zeigten die geringsten Verluste, wogegen unter Senf, der 4er Mischung und besonders Klee erhebliche Mengen an $N_{\min}$ in den Unterboden verlagert wurden. Drei Faktoren beeinflussen den $N_{\min}$ -Pool im Boden während des Zwischenfruchtanbaus:

- 1. Auswahl der Zwischenfruchtart:** z. B. Leguminose oder Nicht-Leguminose, winterhart oder abfrierend.
- 2. C/N Verhältnis der Zwischenfruchtbiomasse:** Je enger desto schneller die Mineralisation.
- 3. Zeitpunkt des Absterbens/Abtötens:** Je eher desto mehr Mineralisation über den Winter.

Je enger das C/N Verhältnis der Zwischenfrucht, umso näher sollte der Zeitpunkt der Einarbeitung an dem Saatzeitpunkt der Folgekultur liegen. Gerüststoffreiche Zwischenfruchtstreu (wie z. B. Stängel von Gelbsenf oder Sonnenblume) mit weitem C/N Verhältnis kann auf der anderen Seite bei zu später Einarbeitung zu einer temporären Stickstoffsperre im Boden führen. Mischungen können hier Schwachstellen von einzelnen Arten kompensieren. Sie liefern damit nicht nur ein breiteres Nährstoffspektrum (siehe Kapitel 6), sondern auch eine schnelle Nährstofffreisetzung für die Folgekultur ohne hohe Verluste.

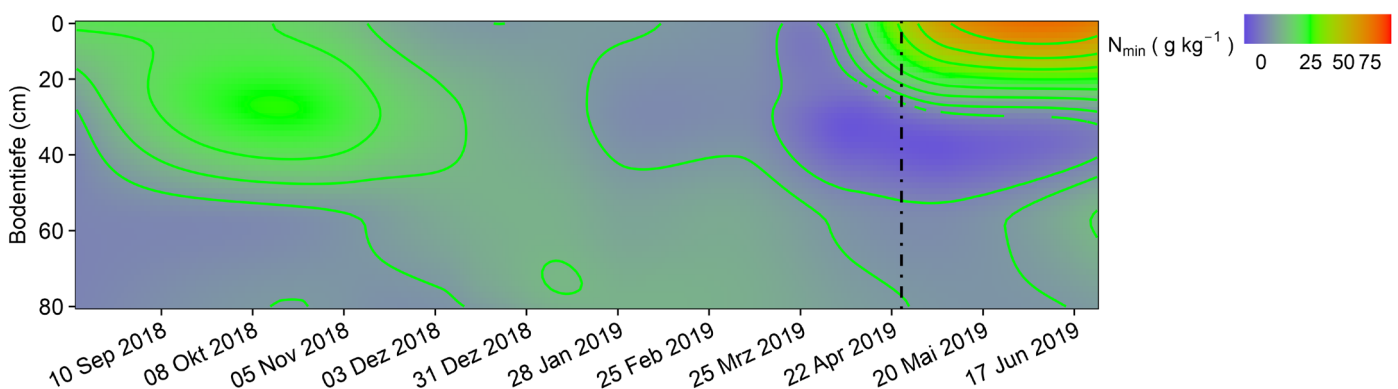


Abb. 4-3: Kontinuierliche Messungen von $N_{\min}$ im Boden unter der Brache von Herbst 2018 bis Sommer 2019 am Standort Asendorf. Die gestrichelte Linie markiert die Maisausaat und Stickstoffdüngung. Farben beschreiben $N_{\min}$ -Konzentrationsänderungen über die Zeit (x-Achse). Die $N_{\min}$ -Verluste aus dem Bodenprofil summierten sich auf 102 kg ha^{-1} bis zur Maisausaat.

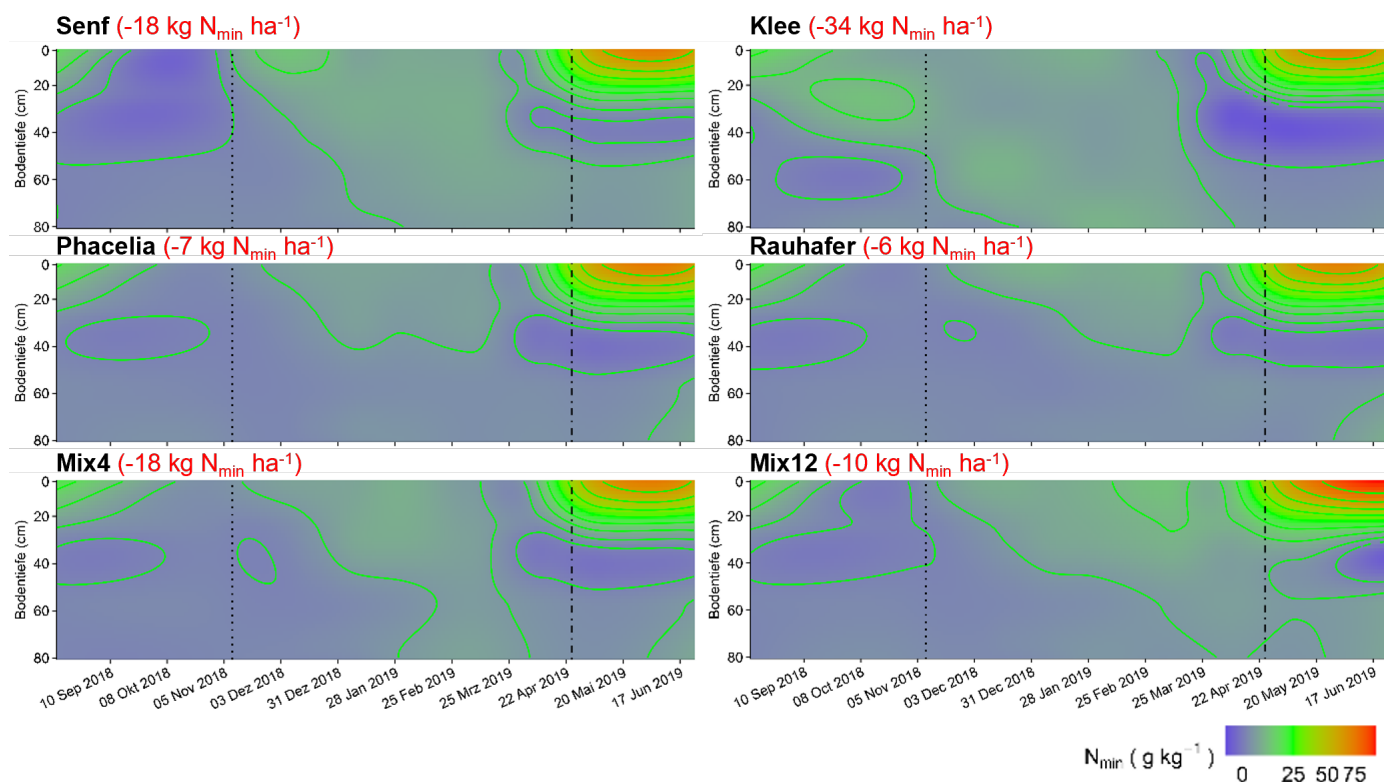


Abb. 4-4: Kontinuierliche Messungen von $N_{\min}$ im Boden unter verschiedenen Zwischenfrüchten von Herbst 2018 bis Sommer 2019 am Standort Asendorf. Die gestrichelten Linien markieren das Absterben der Zwischenfrucht in 2018 und die Maisaussaat mit Stickstoffdüngung in 2019. Die Farben beschreiben Stickstoffkonzentrationsänderungen über die Zeit (x-Achse).

4.3 BODENSTRUKTUR UND WASSERHAUSHALT

Die Bodenstruktur ist ein wichtiger Indikator für den Zustand des Bodens und dessen Fruchtbarkeit. Bodenstruktur beschreibt das Gefüge der festen Bodenpartikel und des Porenraums dazwischen. Damit ist die Bodenstruktur eine wichtige Steuergröße für Wasser- und Nährstoffflüsse, Gasaustausch mit der Atmosphäre und biologische Aktivität. Durch eine gute Bodenstruktur wird Staunässe vermindert und der Boden für die Wurzeln leichter erschließbar, das heißt es stehen mehr Nährstoffe und Wasser für das Wachstum der Pflanzen zur Verfügung. Innerhalb der vorgegebenen Grenzen durch die Bodenart (Textur) und bodenchemischen Parametern lässt sich durch den Anbau von Zwischenfrüchten die Bodenstruktur verbessern. Pflanzen üben über direkte und indirekte Pfade Einfluss auf die Bodenstruktur aus:

1. **Wurzelmorphologie** - Unterschiede von Pflanzen in Durchwurzelungstiefe, Wurzeldichte, Wurzeldurchmesser wirken auf Bioporen im Boden;
2. **Wurzelabscheidungen** - Wurzelexsudate als Bindemittel für Partikel;
3. **Streuqualität** - die Zersetzung energiereicher Streu mobilisiert Polysaccharide als Bindemittel für Bodenpartikel;

4. Bodenorganismen - Pflanzen beeinflussen das Mikrobiom im Wurzelraum (siehe Kapitel 3), insbesondere die Bodenpilze sind ein Schlüsselfaktor zur Aggregatbildung.

Über die Auswahl der Kulturen, die auf dem Feld wachsen, sei es als Zwischenfrucht oder Hauptfrucht, lassen sich daher unterschiedliche Effekte auf die Bodenstruktur erreichen. So zeigen Studien beispielsweise, dass die Makroporosität und Aggregatstabilität während des Wachstums unterschiedlicher Zwischenfrüchte von ihrer Wurzelmorphologie abhängt³⁰. Die Aggregatstabilität ist ein wichtiger Indikator für den Zustand der Bodenstruktur. Im Allgemeinen liegt im Boden eine Mischung von Aggregaten unterschiedlicher Größenklassen vor. Dabei setzen sich Makroaggregate aus kleineren Aggregatklassen zusammen, die durch organische Bindemittel zusammenhalten. Größere Aggregate im Boden begünstigen größere Porendurchmesser und verbessern damit den Wasser-, Luft- und Nährstofffluss im Boden. Im Labor wird die Stabilität der Bodenaggregate nach einer definierten Krafteinwirkung (z. B. durch Wasser) gemessen. Je mehr Aggregate dieser standhalten, desto stabiler ist das Bodengefüge im Feld gegenüber Stresswirkung (z. B. Schadverdichtung, Erosionsanfälligkeit).

Die Aggregatstabilität der unterschiedlichen Zwischenfruchtbehandlungen wurde im CATCHY-Dauerversuch nach der zweiten Zwischenfrucht gemessen. Um den direkten Einfluss der unterschiedlichen Pflanzenarten auszuschließen, wurden die Messungen nicht während der Zwischenfrucht, sondern unter Winterweizen durchgeführt. In Abb. 4-5 ist der mittlere Durchmesser wasserstabiler Aggregate (MWD) dargestellt. Je höher der MWD, desto größer ist der mittlere Durchmesser der Bodenaggregate nach der Krafteinwirkung durch Wasser. Alle Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten weisen einen zwischen 10 % bis 19 % höheren MWD im Vergleich zur Brache auf. Außer bei Rauhafer waren die Unterschiede zur Brache statistisch signifikant (Abb. 4-5). Der höchste MWD wurde unter der 12er Mischung gemessen, gefolgt von der 4er Mischung und Alexandrinerklee. Die statistischen Modelrechnungen ergaben, dass Zwischenfruchtmischungen ein höheres Potenzial (16 %) zur Verbesserung des MWD aufweisen als Reinsaaten (12 %). Regressionsanalysen zeigen außerdem, dass mehr C_{org} in größeren Aggregaten akkumuliert wird. Das weist daraufhin, dass Zwischenfrüchte organische Bindemittel in den Boden eintragen, welche für die Verkitung größerer und stabilerer Aggregate sorgen³¹.

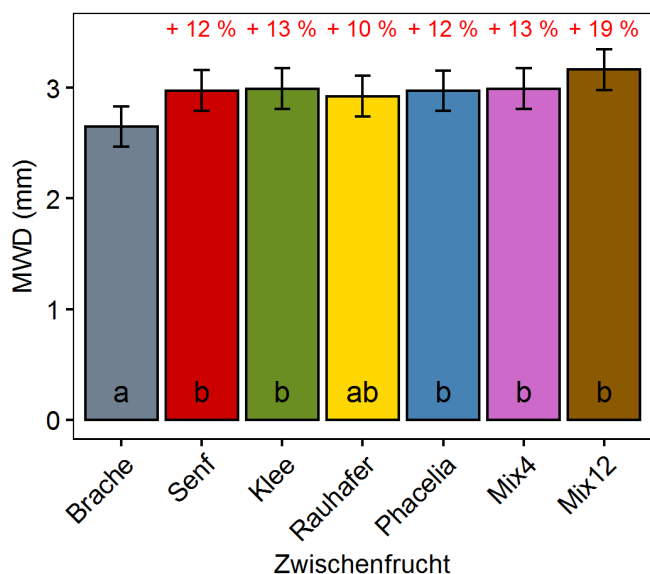


Abb. 4-5: Einfluss von Zwischenfrüchten auf den mittleren Durchmesser wasserstabiler Aggregate (MWD) im Boden. Kleine Buchstaben zeigen die Zugehörigkeit von statistisch unterschiedlichen Behandlungen. Die roten Werte geben die Erhöhung des MWD in Prozent im Vergleich zur Brache an.

Jede Bodenbearbeitung (z. B. Saatbeetbearbeitung) führt zu Veränderungen der Aggregatstrukturen und damit zur Veränderung des Porenvolumens im Boden. Lockerung erhöht das Volumen an Grobporen was auf der einen Seite gut für Keimung und Durchlüftung ist. Auf der anderen Seite

verringert Bodenbearbeitung jedoch die zur Wasserspeicherung wichtigen Mittelporen, zerstört Makroaggregate und Porensysteme. Dies kann sich negativ auf Erosionsanfälligkeit und pflanzenverfügbare Bodenwasserreserven auswirken. Zwischenfrüchte können negative Effekte, die durch Bearbeitungsmaßnahmen entstehen, zumindest teilweise kompensieren. Alle untersuchten Zwischenfrüchte zeigten Verbesserungen der Aggregatstabilität wobei biodiverse Zwischenfruchtmischungen das höchste Potenzial aufwiesen. Die Verbesserungen zeigten sich in den Versuchen nach der dritten kompletten Fruchtfolge (d.h. nach 6 Jahren und drei Zwischenfruchtkulturen). Die langfristige Etablierung von Zwischenfrüchten als fester Bestandteil der Fruchtfolge verbessert den Aufbau größerer und stabilerer Bodenaggregate.

ZUSAMMENFASSUNG

Die dauerhafte Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge führt langfristig zur Erhöhung des Humusgehalts im Boden. Solange Zwischenfrüchte ein fester Bestandteil der Fruchtfolge bleiben kann damit auch Kohlenstoff im Boden gespeichert werden. Die Menge des festgelegten Kohlenstoffs hängt jedoch stark von den Standorteigenschaften wie Klima, Bodenart und Hydrologie ab. Auch das Management und das Ausgangsniveau des Humusgehalts zu Beginn der Maßnahmen spielen eine entscheidende Rolle. In gut versorgten, humusreichen Böden ist der Humusaufbau durch Zwischenfrüchte geringer als in Humus verarmten Böden.

Zwischenfrüchte sind ein unverzichtbares Werkzeug, um Stickstoff und andere Pflanzennährstoffe effizient zu managen. Die Stickstoffverluste reduzieren sich auf ein Minimum, wenn die richtige Zwischenfruchtart oder Mischung eingesetzt wird. Auch die Erschließung von Nährstoffen aus dem Bodenvorrat kann durch die Auswahl der richtigen Zwischenfrucht unterstützt werden. Die Freisetzung der Nährstoffe aus der Zwischenfruchtbiomasse muss langfristig über mehrere Folgekulturen betrachtet werden. Für die direkte Folgekultur spielt das C/N Verhältnis der Zwischenfruchtbiomasse eine wichtige Rolle, verliert aber mit zunehmender Zersetzung an Bedeutung.

Bodenstruktur und Wasserhaushalt werden durch Zwischenfrüchte verbessert. Zwischenfrüchte führen zum Aufbau stabilerer und größerer Bodenaggregate und können zu einem gewissen Maße negative Einflüsse durch Bodenbearbeitung kompensieren. Vor allem Zwischenfruchtmischungen erweisen sich sehr positiv auf Aggregatbildung und Wasserverfügbarkeit.

KURZ GELESEN

- Zwischenfrüchte führen langfristig zu einer Erhöhung des Humusvorrats. Voraussetzung dafür ist eine dauerhafte Etablierung von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge und ein Gleichgewichtszustand des Humuskörpers zu Beginn der Maßnahme.
- Nährstoffverluste aus Ackerböden werden durch Zwischenfrüchte minimiert.
- Die Nährstofffreisetzung aus Zwischenfruchtbiomasse hängt in der ersten Folgekultur stark von dessen C/N Verhältnis ab.
- Zwischenfrüchte fördern die Bildung von Bodenaggregaten und deren Stabilität.
- Negative Einflüsse von Bodenbearbeitung auf die Bodenstruktur können durch Zwischenfrüchte teilweise kompensiert werden.

Infobox 4-2.

5. Blick unter die Oberfläche - wie Zwischenfrüchte den Wurzelraum gestalten

Barbara Reinhold-Hurek, Thomas Hurek, Michał Oskiera, Norman Gentsch

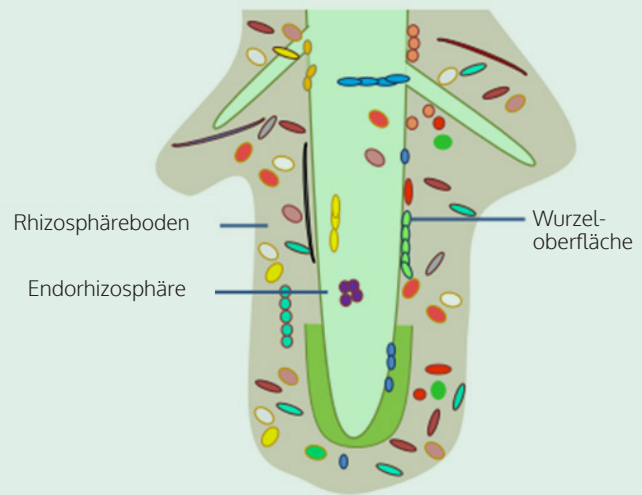
Egal ob Zwischenfrucht oder Hauptfrucht, alle Pflanzen leben in Gemeinschaft mit unzähligen Mikroorganismen. Deren Gesamtheit wird als Mikrobiom bezeichnet. Pflanzen haben sich zusammen mit ihren Mikrobiomen entwickelt und im Laufe von Millionen von Jahren zahlreiche Beziehungen zu ihnen aufgebaut. Dieses sehr komplexe Ökosystem funktioniert wie ein großer Organismus und wird in der Wissenschaft als Holobiont bezeichnet. Jeder Partner der Gemeinschaft erfüllt spezifische Funktionen im System, und das Zusammenspiel aller Komponenten bildet ein funktionierendes Gleichgewicht.

Pflanzenarten haben verschiedene Bedürfnisse in Bezug auf ihre Nährstoffversorgung oder können von spezifischen Krankheitserregern befallen werden. Als nicht mobile Organismen sind sie dabei noch mehr als Tiere darauf angewiesen, mit ihrer Umwelt in Kontakt zu treten. Das bedeutet, dass Pflanzen über ihre Wurzeln aktiv Signalstoffe ausscheiden, um aus der Fülle an Mikroorganismen, die im Boden vorkommen, teilweise diejenigen im Wachstum zu fördern, die ihnen nützlich sein können. Auf der anderen Seite scheidet die Pflanze auch antimikrobielle Substanzen (wie z. B. Senfölglykoside) aus, um zum Beispiel krankheitserregende Organismengruppen

im Wachstum zu unterdrücken. Jede Pflanzenart etabliert dadurch ein ganz spezifisches Mikrobiom in ihrer unmittelbaren Wurzelumgebung und schafft damit eine einzigartige Rhizosphäre (siehe Infobox 5-1). Dieses Rhizosphärenmikrobiom ist eine Art mikrobieller Fingerabdruck, den Pflanzenarten - und sogar Sorten - im Boden hinterlassen. Im Holobionten-Ökosystem versorgt die Pflanze Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze, die in, auf und um ihr Leben, mit Energiequellen wie Zuckern, die sie über die Photosynthese hergestellt hat. Die Mikroorganismen wiederum helfen der Pflanze bei der Nährstoffversorgung, aber auch bei der Immunabwehr oder Stressbewältigung. Kombiniert man nun unterschiedliche Pflanzenarten, z. B. in Zwischenfruchtmischungen, erhält man ein breiteres Spektrum an chemischen Verbindungen, die in den Wurzelraum abgegeben werden. Gleiches gilt für die Zusammensetzung der Spross- und Wurzelstreu (siehe Kapitel 6, Elementzusammensetzung). Pflanzenabscheidungen, Streustoffe und organische Bodensubstanz (Humus) sind die Hauptnahrungsquelle für Mikroorganismen im Boden und wirken sich - je nach chemischer Beschaffenheit - unterschiedlich auf das Wachstum von Mikroorganismengruppen aus.

DIE RHIZOSPHERE

Rhiza bedeutet im Griechischen "Wurzel". Der Rhizosphäreboden ist die dünne Bodenschicht, die an den Pflanzenwurzeln haftet. Sie ist ein Hotspot für Mikroorganismen, die unter direktem Einfluss der Pflanze stehen. Bakterien besiedeln auch die Oberfläche der Wurzeln und sogar das Wurzelinnere (Endorhizosphäre). Die Pflanzenrhizosphäre ist die artenreichste Nische für Bakterien. Analysen zeigten, dass die Rhizosphäre eine höhere mikrobielle Diversität als der umliegende Boden selbst und als die Wurzel besitzt. Außerdem ist die Rhizosphäre der Ort für Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanze. Über ihre Wurzeln scheiden Pflanzen spezielle chemische Verbindungen aus, die das Wachstum bestimmter Gruppen von Bodenmikroorganismen fördern.



Infobox 5-1.

Im Projekt CATCHY wurde der mikrobielle Fingerabdruck im wurzelfreien Boden, Rhizosphärenboden und in den Wurzeln von unterschiedlichen Zwischenfrüchten in Reinsaat und in Mischungen untersucht. Mikrobielle Fingerabdrücke können über Gensequenzen erhalten werden, die mit modernen Techniken zu Tausenden sequenziert werden (siehe Infobox 5-2). Dabei zeigte sich deutlich, dass unterschiedliche Pflanzenarten sich darin unterscheiden, mit welchen Bakterien ihre Wurzeln vergesellschaftet sind: Die einzelnen Zwischenfruchtarten wie Senf, Rauhafer und Alexandrinerklee wurden zwar zum Großteil von denselben Bakterien besiedelt, zeigten aber auch einige Bakterien, die nur in einer Art vorkamen (Abb. 5-1). Die große Anzahl an Bakterien, die alle Arten besiedelten, ist dadurch erklärbar, dass alle Pflanzen im selben Ackerboden wuchsen. Unter diesen Bakterien befinden sich zum Beispiel *Pseudomonas*, eine Bakteriengattung, die viele pflanzenassoziierte Arten beinhaltet. Viele von ihnen können helfen, Pflanzenkrankheiten zu unterdrücken, oder Pflanzenwachstum zu fördern. Eine interessantere Rolle bei der Analyse des Einflusses der Zwischenfruchtarten auf das Mikrobiom spielen die Mikroorganismen, die nur in einer Art vorkommen. Hier fand sich zum Beispiel *Nitrobacter* speziell bei Klee, diese Bakterien sind am Stickstoffumsatz im Boden beteiligt. Durch die unterschiedlichen Abscheidungen der Wurzeln und auch durch die Zersetzung der unterschiedlichen Streu kann sich durch verschiedene Zwischenfruchtarten

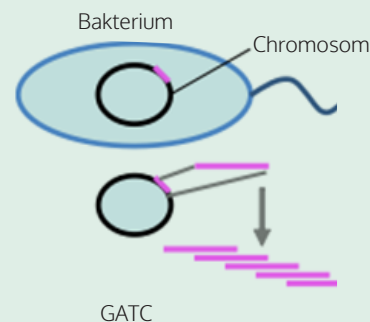
dann auch die Mikroorganismengemeinschaft im Boden (Abb. 5-2) und selbst in der Folgefrucht Mais ändern.

INFOBOX

ILLUMINA MISEQ AMPLIKON-SEQUENZIERUNG ZUR CHARAKTERISIERUNG DES MIKROBIOMS

Analyse von Markergenen der Mikroorganismen aus Umweltproben:

- Extraktion der Erbsubstanz (DNA)
- Vervielfältigung des Markergens (für ribosomale RNA: 16S rRNA)
- Sequenzierung der Basenabfolge und bioinformatischer Sequenzvergleich, bis zu mehrere Millionen Sequenzen gleichzeitig



Infobox 5-2.

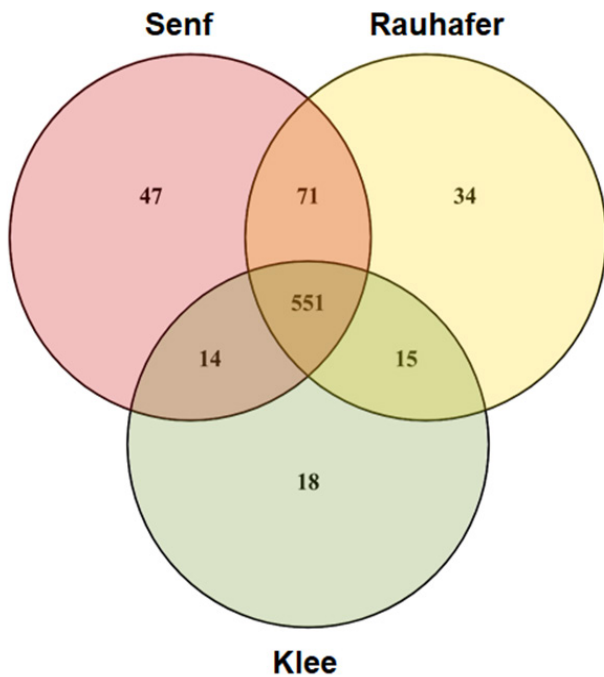


Abb. 5-1: Bakterielle DNA in Wurzeln von verschiedenen Zwischenfrüchten (Senf, Rauhafer, Klee), die am gleichen Standort, Asendorf, wachsen, wurde analysiert. Das Diagramm zeigt Überschneidungen und Unterschiede der in Wurzeln gefundenen Bakteriengattungen, die Zahlen geben die Anzahl der Gattungen an. Z. B. wurden 551 Gattungen in allen drei Arten gefunden.

Teilweise konnte tatsächlich beobachtet werden, dass Zwischenfrüchte einen Einfluss auf die mikrobielle Vielfalt im Boden ausüben. Unter mikrobieller Vielfalt versteht man - vereinfacht ausgedrückt - die Anzahl der vorkommenden Arten oder Gruppen von Mikroorganismen. In manchen Jahren zeigte sich nach beiden getesteten Mischungen (4er und 12er Mischung) während der Vegetation der Hauptfrucht Mais im Boden ein Trend zu einer höheren Vielfalt von Bakterien im Vergleich zur Brache oder Reinsaaten (Abb. 5-2). Neben Bakterien gehören auch Pilze zum Mikrobiom - neben den bekannten Mykorrhiza-Pilzen besiedeln viele verschiedene weitere Pilze die Wurzeln. Auch die Vielfalt der Wurzelpilze wird beeinflusst, sie war nach Anbau der 12er Mischung in Maiswurzeln besonders hoch (Abb. 5-3). Es spielt also eine Rolle für die mikrobielle Gemeinschaft, ob der Boden als Brache vegetationsfrei bleibt, oder ob Zwischenfrüchte in Reinsaaten oder Mischungen den Acker bedecken.

5.1 WARUM IST DIE DIVERSITÄT DER MIKROORGANISMENGEMEINSCHAFT IM BODEN ÜBERHAUPT WICHTIG?

Eine höhere mikrobielle Vielfalt im Boden verbessert die Funktion des Ökosystems, wodurch dieses widerstandsfähiger gegen Störungen wird^{32,33}. Eine hohe mikrobielle

Vielfalt bietet die Möglichkeit, wesentliche Ökosystemfunktionen, wie die Produktion von Enzymen oder anderen Verbindungen, zwischen verschiedenen Mitgliedern der Gemeinschaft zu kompensieren. Wenn wichtige Gruppen von Mikroorganismen aufgrund von Umweltstörungen schwinden, z. B. durch eine Veränderung des pH-Wertes im Boden, können das Wachstum und die Aktivität anderer Mitglieder, die ähnliche Funktionen erfüllen, dies ausgleichen. Diversität ist also eine Art Versicherung, dass alle Bodenfunktionen trotz Artenverlustes infolge von Umweltänderungen innerhalb der Bodenbiologie auch weiterhin aufrechterhalten werden können. Vor allem der Anbau von Zwischenfruchtmischungen kann dazu beitragen, diversere Mikrobiome im Boden zu fördern.

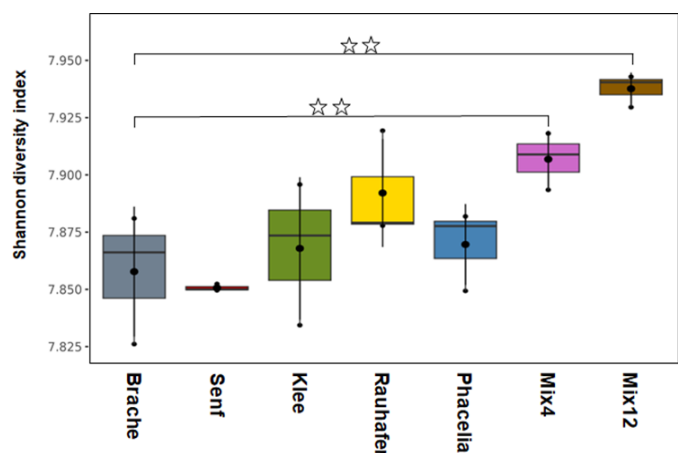


Abb. 5-2: Vielfalt der Bakterien im Boden nach Zwischenfruchtanbau am Standort Triesdorf. Gezeigt ist die Diversität der Bakterien im Boden während der Standzeit der Folgefrucht Mais nach Anbau von verschiedenen einzelnen Zwischenfruchtreinsaaten, Mischungen oder der Brache. Diversitätsindex: Shannon. Sterne geben signifikante Unterschiede an.

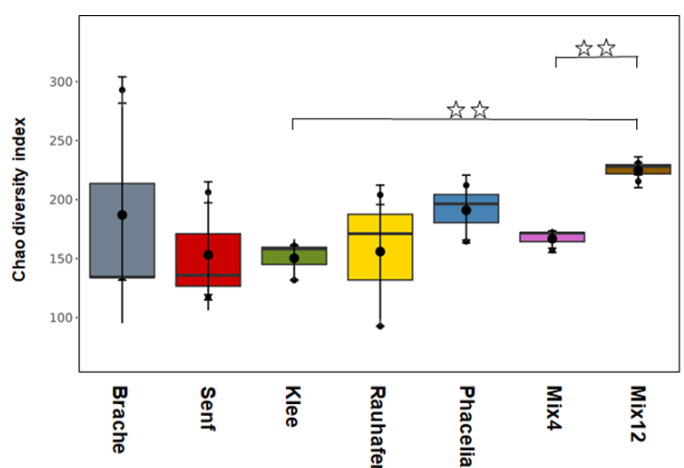


Abb. 5-3: Vielfalt der Pilze in und auf Wurzeln von Mais nach Zwischenfruchtanbau am Standort Asendorf. Gezeigt ist die Diversität der wurzelassoziierten Pilze während der Standzeit der Folgefrucht Mais nach Anbau von verschiedenen einzelnen Zwischenfruchtreinsaaten, Mischungen oder der Brache. Diversitätsindex: Chao. Sterne geben signifikante Unterschiede an.

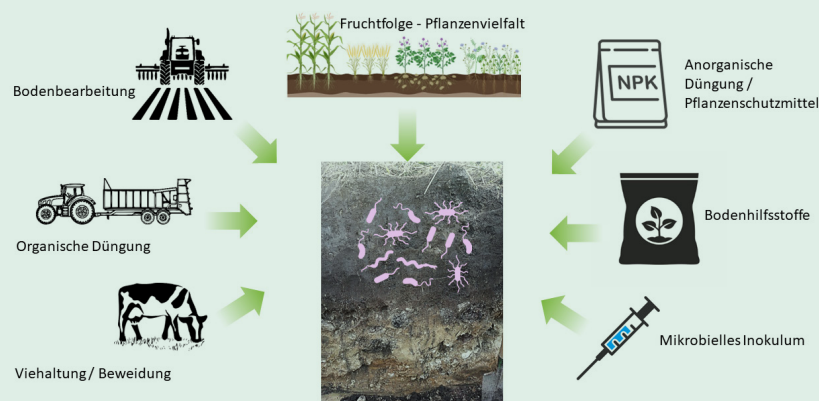
Nach der Aussaat einer Hauptkultur können die jungen Keimlinge nach einer Brache eine andere Mikroorganismengemeinschaft im Boden vorfinden als nach verschiedenen Zwischenfrüchten (Abb. 5-2, 5-3). Pflanzen rekrutieren ihr Mikrobiom meist aus dem Boden. Das heißt, die Vegetationshistorie ist wichtig für das Mikrobiom in und auf einer Kulturpflanze. Je höher die mikrobielle Diversität im Boden ist, umso vielfältiger sind die Gruppen von Mikroorganismen, aus denen die Pflanzen wählen können. Damit erweitert sich auch das Spektrum an Beziehungen, welche zwischen Pflanzen und Mikroben aufgebaut werden können. Je höher die Diversität an Mikroorganismen, die eine Pflanze aus dem Boden

rekrutieren kann, umso vorteilhafter kann es für die Nährstoffaufnahme und Pflanzengesundheit sein. Eine geringere Bakterien- und Pilzvielfalt wurde bei Pflanzen beobachtet, die Krankheiten oder Krankheitserreger enthalten^{34,35}. Im Boden gibt es also Mikroorganismen, die einerseits die Pflanze beim Wachstum unterstützen, andererseits aber auch solche, die als Pathogene das Pflanzenwachstum negativ beeinflussen können. Ziel von Anbaumaßnahmen ist es, im Boden genügend Mikroorganismen zu stimulieren, die das Pflanzenwachstum fördern und Gegenspieler, sogenannte Antagonisten, gegen die Ausbreitung von Krankheitserregern zu vermehren (Infobox 5-3).

INFOBOX

BIOENGINEERING VON MIKROORGANISMENGEMEINSCHAFTEN

Damit werden Maßnahmen bezeichnet, die die Anzahl bestimmter Gruppen von Mikroorganismen, von denen man sich positive Auswirkungen auf Pflanzenwachstum und Bodengesundheit verspricht, im Boden erhöhen. Das Schema zeigt einen Überblick an Maßnahmen, um Einfluss auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden auszuüben. Wichtige mikrobielle Gruppen, deren positiver Einfluss auf das Pflanzenwachstum nachgewiesen wurden, sind z. B. Rhizobien (Knöllchenbakterien der Leguminosen), Mykorrhizapilze, pflanzenwachstumsfördernde Rhizobakterien (z. B. erhöht *Pseudomonas* die Eisenlöslichkeit und -verfügbarkeit für Pflanzen), phosphatlösende Mikroorganismen (z. B. Bakterien der Gattung *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Burkholderia*, und *Pantoea*, sowie Pilze der Gattungen *Penicillium* und *Aspergillus*), oder Organismen zur Biokontrolle durch Bekämpfung von Pflanzenpathogenen (z. B. *Bacillus*-Bakterien, oder Pilze der Gattungen *Trichoderma* und *Gibellulopsis*). Insbesondere die Fruchtfolge und die Pflanzendiversität auf dem Acker sind wichtige Instrumente, mikrobielle Gemeinschaften und Funktionen zu beeinflussen. Zwischenfrüchte können hier ein Instrument sein, ohne zusätzliche Hilfsstoffe positive mikrobielle Funktionen im Boden zu stimulieren.



Infobox 5-3.

Um herauszufinden, ob Zwischenfrüchte auch das Mikrobiom in der Folgekultur Mais unterschiedlich beeinflussen können, wurden Proben lebender Maiswurzeln entnommen. Die folgenden Untersuchungen des Mikrobioms erbrachten erstaunliche Ergebnisse. Tatsächlich lassen sich bestimmte Mikroorganismen nur nach

ganz bestimmten Zwischenfrüchten in den Maiswurzeln feststellen oder treten dort häufiger auf. Dazu wurden taxonomische Untersuchungen zur Zusammensetzung der Pilzgattungen in Maiswurzeln durchgeführt. Bei diesen Analysen des Pilzmikrobioms (Abb. 5-4) zeigte sich, dass interessanterweise die häufigsten gefunde-

nen Pilzarten nicht zu den Mykorrhizapilzen gehörten. Mykorrhizen der Gruppe Glomeromycota wurden nur in geringer Zahl in den Maiswurzeln gefunden. Allerdings wurde eine Vielzahl nützlicher Pilze gefunden, die in und auf Maiswurzeln leben. Sie wurden vor allem durch den Anbau von *Phacelia* und der 12er Mischung angereichert. Beide Zwischenfruchtvarianten führten zu einer signifikanten Anreicherung einiger Gattungen von *Sordariomycetes* und *Mortierella*, unterdrückten aber andererseits *Gremmenia* Arten, die oft Pathogene enthalten.

Zur Klasse der Sordariomyceten gehören einige Pilzgattungen, die pflanzenwachstumsfördernde und schaderregerunterdrückende Arten enthalten (z. B. *Acremonium*, *Cladorrhinum*, *Exophiala*). Zur Gattung *Mortierella* gehören Biokontroll-Stämme gegen Nematoden oder phosphatmobilisierende Stämme. Eine wichtige Entdeckung war, dass die Gattung *Gibellulopsis* nach der 12er Mischung und nach *Phacelia* der am häufigsten vorkommende Pilz in Maiswurzeln war. Diese Pilze sind als Biokontrollmittel gegen Erreger der Wurzelfäule *Rhizoctonia solani*, oder auch gegen die Erreger der *Verticillium*-Welke wirksam. Weiterhin trat nach allen Zwischenfruchtbehandlungen eine neue Pilzgattung, *Metacordyceps*, auf, die in der Brache nicht beobachtet worden war. *Metacordyceps* ist ein sehr spezieller sogenannter entomopathogener Pilz, der -die Larven von Schadinsekten und Nematoden im Boden befällt. Pilze der Gattung *Fusarium* wurden in Maiswurzeln am häufigsten nach Senf und Brache und am seltensten nach *Phacelia* beobachtet. Das deutet darauf hin, dass *Phacelia* der Ausbreitung von diesen Schaderregern am besten entgegenwirkt. Pilze der Gattung *Endogone* wurden nur in Rauhafer und Rauhafer-enthaltendem Mix4 gemessen und konnten dann auch in der Folgefrucht Mais gefunden werden. Die Gattung recycelt totes pflanzliches Gewebe und ist daher für Nährstoffkreisläufe bedeutsam.

Auch Bakteriengemeinschaften zeigten interessante Veränderungen. Speziell nach dem Anbau der 12er Mischung waren die Stickstofffixierer *Nitrospirillum*, *Dexia* und *Leptothrix* in Maiswurzeln angereichert, während die typischen Bodenbakterien *Geobacter* im Vergleich zu allen anderen Behandlungen abnahmen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Mikroorganismen mit positivem Einfluss auf den Stickstoffkreislauf in den Pflanzen bereits durch den einmaligen Anbau artenreicher Zwischenfruchtmischungen gefördert werden.

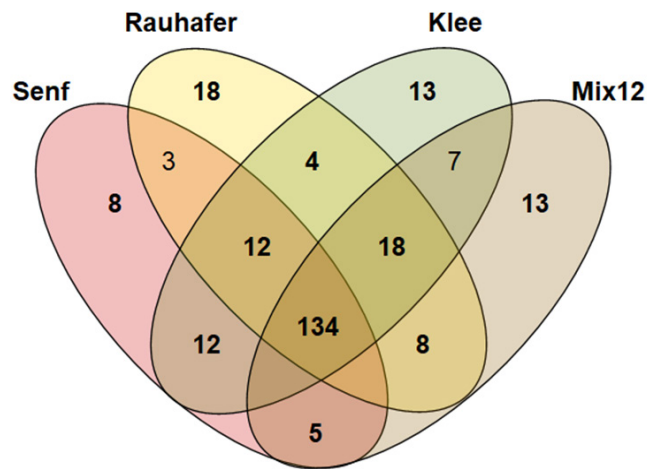


Abb. 5-4: Pilz-DNA in Wurzeln von Mais nach verschiedenen Zwischenfrüchten am Standort Asendorf. Das Diagramm zeigt Überschneidungen und Unterschiede der in Wurzeln gefundenen Pilzgattungen, die Zahlen geben die Anzahl der Gattungen an. Zum Beispiel wurden in Maiswurzeln nach allen 4 Zwischenfruchttypen 134 gleiche Gattungen gefunden.

Zwischenfrüchte können ein wirksames und umweltfreundliches Instrument sein, um die Zusammensetzung des Mikrobioms in landwirtschaftlichen Böden zu beeinflussen (siehe Infobox 5-3). Die Erhöhung der Pflanzenvielfalt im Zwischenfruchtanbau kann eine größere Diversität von Mikroorganismen im Boden bewirken. Die Fruchtfolge sollte dabei jedoch immer im Auge behalten werden. Zu enge Kulturabstände bestimmter Pflanzenarten können auch zu einer Anreicherung von Schaderregern im Boden führen. Für genauere Aussagen, welche Pflanzen welche mikrobiellen Gruppen im Boden beeinflussen, benötigt es jedoch noch weitere Untersuchungen.

5.2 EFFIZIENTE STICKSTOFFVERSORGUNG DURCH MIKROORGANISMEN

Das Bodenmikrobiom in landwirtschaftlich genutzten Böden ist jedoch nicht nur wichtig für Pflanzensymbiosen und Abwehr von Schaderregern. Nahezu alle Bodenfunktionen sind an mikrobielle Prozesse gekoppelt. Die Zersetzung von organischer Substanz und Ernteresten ist eine der wichtigsten Ökosystemfunktionen von Mikroorganismen. Bei der Zersetzung werden Nährstoffe in pflanzenverfügbaren Formen frei und ein großer Teil des Kohlenstoffs aus der Biomasse als CO_2 veratmet. Ein Teil des nicht veratmeten Kohlenstoffs wird benötigt, um die körpereigene Biomasse der Mikroorganismen aufzubauen. Die mikrobielle Biomasse ist daher ein wichtiger Speicher und zugleich Quelle für Kohlenstoff und Pflanzennährstoffe. Ein Ackerboden mittlerer Wertigkeit

enthält im Oberboden im Schnitt etwa 500 bis 600 kg ha⁻¹ Kohlenstoff in Form mikrobieller Biomasse³⁶. Weitere etwa 100 bis 160 kg ha⁻¹ sind als Stickstoff (N_{mic}) und etwa 40 kg ha⁻¹ als Phosphor (P_{mic}) in der mikrobiellen Biomasse gespeichert. Die Umsatzzeiten von Stickstoff und besonders Phosphor in der mikrobiellen Biomasse sind vergleichsweise kurz. Der jährliche Stickstofffluss durch die mikrobielle Biomasse liegt bei etwa 80 bis 100 kg ha⁻¹, der P Fluss bei etwa 10 bis 40 kg ha⁻¹. Das bedeutet, ein großer Teil der Pflanzenernährung auf dem Acker erfolgt über die Zellen von Mikroorganismen. Vor diesem Hintergrund sollte in landwirtschaftlichen Böden eine möglichst hohe mikrobielle Biomasse mit hohen Umsatzraten angestrebt werden³⁶.

Zwischenfrüchte erfüllen genau diese Funktion. Sie erhöhen die mikrobielle Biomasse im Boden und sorgen somit für schnelle und effektivere Nährstoffkreisläufe. Die Messungen am Standort Asendorf zeigen, dass die jährlichen Schwankungen des N_{mic} ohne Zwischenfrucht (Brache) zwischen 25 und 230 kg ha⁻¹ im Oberboden betragen können (Abb. 5-5). Mit Zwischenfrüchten werden geringere Extrema beobachtet, und die jährlichen N_{mic} Schwankungen betragen nur zwischen 50 und 200 kg ha⁻¹. Ein starker N_{mic}-Abfall wird besonders im Winter beobachtet, wenn keine lebenden Pflanzen den Boden bedecken. Auch im Sommer sorgen die Wasser- und Nährstoffkonkurrenz der Pflanzen zu einem starken Rückgang des N_{mic}. Die höchste mikrobielle Biomasse und damit auch die höchsten N_{mic}-Vorräte sind gewöhnlich im Frühjahr/Frühsummer und Herbst zu finden. Dann sind Bodentemperatur und Wassergehalt im Optimum und die Konkurrenz durch lebende Pflanzen ist gering. Ähnlich wie die Biomasse der Zwischenfrüchte ist die Biomasse der Mikroorganismen Senke und Quelle für Stickstoff im Boden. Über den Winter findet sich konstant zwischen 15-50 kg ha⁻¹ mehr Stickstoff in der mikrobiellen Biomasse unter Zwischenfrüchten wieder (Abb. 5-5). Dieser Stickstoff ist ähnlich wie in der Pflanzenbiomasse temporär vor Auswaschung geschützt. Gleichzeitig ist die mikrobielle Biomasse im Vergleich zur Brache besser mit Stickstoff versorgt, Mikroorganismen sind also weniger stickstofflimitiert. Mikroorganismen, die weniger stickstofflimitiert sind, tragen zu einem effizienteren Humusaufbau bei und verringern Kohlenstoffverluste in die Atmosphäre. Nach einer mineralischen Düngung zur Hauptfrucht ist eine gute Stickstoffversorgung der mikrobiellen Biomasse ebenso vorteilhaft. Da die besser versorgten Mikroorganismen nicht an Stickstoffmangel leiden, zeigt sich auch

eine geringere Stickstoffimmobilisierung aus den ausgebrachten Mineraldüngern in der mikrobiellen Biomasse im Vergleich zur Brache (Abb. 5-5 geringere Maximalamplitude). Damit stellt die mikrobielle Biomasse nach Zwischenfrüchten eine geringere Konkurrenz zur Hauptkultur um Pflanzennährstoffe im Boden dar als ohne Zwischenfruchtanbau. Die getesteten Zwischenfruchtmischungen zeigen durchweg eine leichte Verbesserung der o.g. Kreisläufe im Vergleich zu den Reinsaaten. Sowohl die mikrobielle Biomasse als auch die mikrobielle Stickstoffversorgung werden durch Zwischenfruchtmischungen optimiert. Ein wichtiger Grund dafür ist die Verbesserung der Einträge in die Rhizosphäre, aber auch die Qualität der Zwischenfruchtstreu. Besonders das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) in der Zwischenfruchtbio-masse ist ein guter Indikator, wie effizient Mikroorganismen Streustoffe umsetzen und Nährstoffe mobilisieren (Siehe Kapitel 6, Nährstoffaufnahme). Durch die Steuerung des C/N-Verhältnisses in der Biomasse von Zwischenfrüchten lassen sich daher auch mikrobielle Umsetzungsprozesse bis hin zur Zusammensetzung des mikrobiellen Artenspektrums beeinflussen.

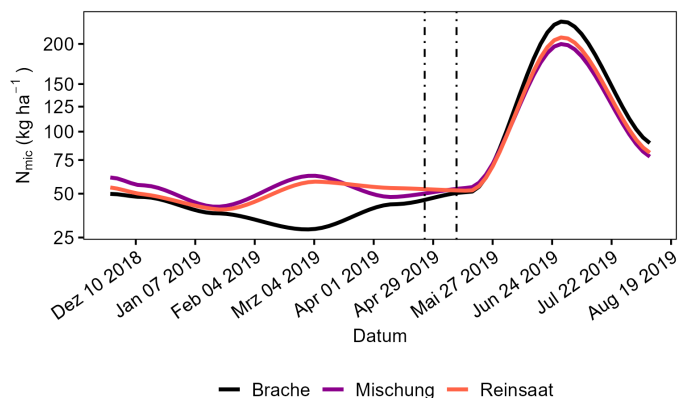


Abb. 5-5: Zeitlicher Verlauf von Stickstoff in der mikrobiellen Biomasse im Oberboden am Standort Asendorf. Die Linien stellen Mittelwerte von unterschiedlichen Probenahmedaten dar. Die gestrichelten Linien zeigen Aussaat und Düngung der Mais-Hauptfrucht.

Ein ausgewogeneres und stabileres Milieu für Mikroorganismen im Boden bedeutet eine bessere Unterstützung der Pflanzen bei der Aufnahme von Nährstoffen und Wasser. Zwischenfrüchte sorgen durch ihre Wurzelaktivität und Biomasseproduktion für die Grundlage stabiler mikrobieller Populationen im Boden. Die gesteigerte mikrobielle Aktivität resultiert in effizienteren mikrobiellen Nährstoffkreisläufen im Boden und in einer verbesserten Pflanzenversorgung. Im Jahresdurchschnitt sind etwa 1,8 % des gesamten organischen Kohlenstoffs der Brachevariante am Versuchsstandort

Asendorf in der mikrobiellen Biomasse gespeichert. Durch den Einsatz von Zwischenfrüchten erhöht sich dieser Anteil auf 2,1 %. Damit erhöhen sich die jährlichen Umsatzraten von Kohlenstoff durch die mikrobielle Biomasse um 15 %. Zwischenfrüchte bieten damit ein

höheres Potenzial zum Aufbau stabiler Humusverbindungen aus mikrobiellen Überresten. Zwischenfruchtanbau trägt also dazu bei, die CO₂ Speicherung aus der Atmosphäre in Form von mikrobieller Biomasse und Humusaufbau im Boden zu erhöhen.

INFOBOX

KURZ GELESEN

- Pflanzen weisen ein komplexes Mikrobiom auf, das aus Mikroorganismen besteht, die in ihrem Gewebe und um sie herum im Rhizosphäreboden leben.
- Verschiedene Pflanzenarten unterscheiden sich in ihrem Mikrobiom ihrer Wurzeln und der Rhizosphäre
- Der Anbau von Zwischenfruchtmischungen kann die bakterielle und pilzliche Vielfalt im Boden erhöhen und so die Widerstandsfähigkeit des Ökosystems fördern.
- Zwischenfruchtmischungen können auch das Mikrobiom der Hauptfrucht beeinflussen: In Maiswurzeln wurden nach hochdiversen Zwischenfruchtmischungen nützliche Pilze angereichert.
- Zwischenfrüchte verbessern die mikrobielle Biomasse und den Nährstoffkreislauf, was zu einer effizienten Stickstoffversorgung und einem geringeren Kohlenstoffverlust führt.

Infobox 5-4.

6. Wie Zwischenfrüchte den Nährstoffhaushalt beeinflussen

Diana Heuermann, Nicolaus von Wirén

Nährstoffverluste sind ein großes Problem in der modernen Landwirtschaft. Aber um optimale Erträge zu erzielen, muss der Nährstoffbedarf von Hauptkulturen gedeckt werden. Allerdings werden gedüngte Nährstoffe aus verschiedenen Gründen häufig nicht effektiv zur Ertragsbildung genutzt. Mais zum Beispiel hat seinen Hauptnährstoffbedarf erst im Längenwachstum, wenn eine Düngerapplikation mit herkömmlicher Technik nicht mehr möglich ist. Dünger muss somit frühzeitig ausgebracht werden und es entsteht ein ein- bis zweimonatiges Zeitfenster, in dem Nährstoffe ausgewaschen oder gasförmig verloren gehen können. Andere Kulturen wie Raps nehmen Nährstoffe zwar effizienter auf, zeigen aber große Defizite beim Recycling der aufgenommenen Nährstoffe aus den vegetativen Organen (Blätter, Stängel, Wurzel) in die Samen. Somit verbleiben nach der Ernte viele Nährstoffe im Stroh und damit auf dem Feld³⁷. Bei ausreichender Bodenfeuchtigkeit und -temperatur werden Pflanzenreste im Boden durch mikrobiellen Abbau zersetzt und führen zu hohen Nährstoffüberschüssen bzw. -verlusten bevor die Folgefrucht etabliert ist. Diese können abhängig von Hauptfrucht, Management, Standort- und Witterungsbedingungen 25 bis >200 kg Stickstoff pro Hektar betragen^{38–41}. Nach der Ernte der Hauptfrucht kommt es dadurch speziell in den immer regenreicher werdenden Herbst- und Wintermonaten

zu einer kritischen Phase der Nährstoffverluste. Solche Nährstoffverluste können durch den Anbau von Zwischenfrüchten gemindert werden. Zwischenfrüchte können die Nährstoffe aufnehmen, sie damit vor Auswaschung schützen, über den Winter in ihrer Biomasse konservieren und sie während des Wachstums der folgenden Hauptfrüchte wieder freisetzen. Damit können Zwischenfrüchte zur Schließung von Nährstoffkreisläufen beitragen und Nährstoffe dynamisch im System halten.

6.1 NÄHRSTOFFAUFNAHME

Um ein optimales Nährstoffmanagement mit Zwischenfrüchten zu erreichen, ist es zuerst einmal wichtig, die Nährstoffbilanz und -freisetzung nach der vorhergehenden Hauptkultur auf dem Standort (u. a. Witterung, Bodenverhältnisse) einzuschätzen und die Wahl der Zwischenfrucht an möglichen Nährstoffüberhänge und -verlustpotenziale anzupassen. Die Effektivität der Nährstoffaufnahme wird stark durch die gewählte Zwischenfruchtart bestimmt. So haben vor allem im Herbst schnell wachsende Arten wie Gelbsenf oder Ölrettich allein aufgrund ihres hohen Biomassewachstums einen Vorteil in der Nährstoffanreicherung gegenüber langsam wachsenden Arten, was speziell bei späten Saatzeitpunkten von Bedeutung ist. Daneben bedingen die Größe und Gestalt des Wurzelsystems sowie spezifische Nährstoffaneignungsmechanis-

men die Nährstoffaufnahme einzelner Pflanzenarten. Ein tiefes Wurzelsystem wie das von Gelbsenf oder Ölrrettich (Abb. 6-1) bietet den Vorteil, dass leicht auswaschbare Nährstoffe wie Stickstoff in Form von Nitrat oder Schwefel in Form von Sulfat auch aus unteren Bodenschichten aufgenommen und somit vor der Auswaschung ins

Grundwasser gerettet werden können⁴². Im Oberboden verzweigte Wurzelsysteme wie die von Phacelia, Rauhafer oder Saaterbse (Abb. 6-1) können effizienter Nährstoffe erschließen, welche weniger mobil im Boden sind. Dazu gehören zum Beispiel Phosphor und Kalium, welche häufig in schwerlöslichen Verbindungen vorkommen⁴³.

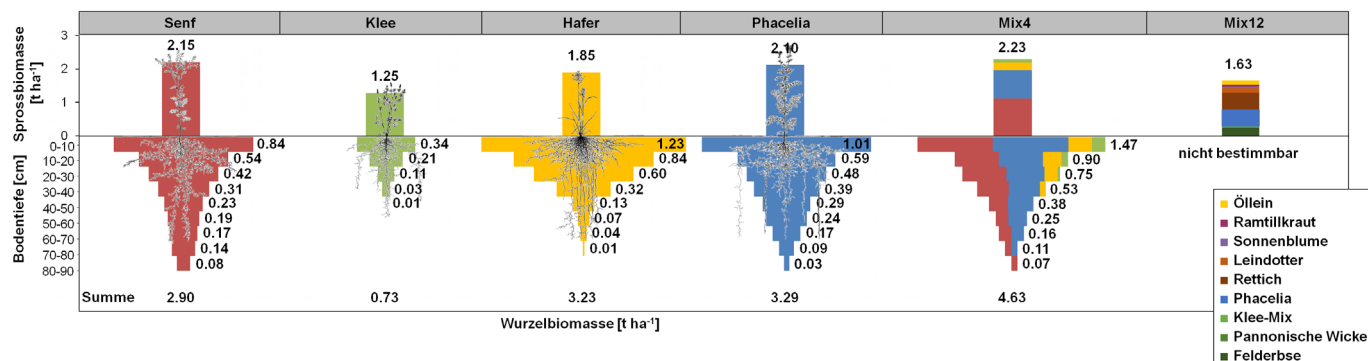


Abb. 6-1: Spross- und Wurzelbiomasse der Zwischenfrüchte Senf (*Sinapis alba*), Klee (*Trifolium alexandrinum*), Rauhafer (*Avena strigosa*) und Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) in Reinsaaten, in der 4er Mischung (Mix4) und in der 12er Mischung (Mix12). Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden über vier Jahre (2015, 2016, 2017, 2019) an zwei Standorten (Asendorf, Niedersachsen und Triesdorf, Bayern) aufgenommen. Die Aussaat erfolgte jeweils zwischen Mitte August und Anfang September. Die Abbildung zeigt den besten linearen unverzerrten Schätzwert für die jeweiligen Biomassen (Stichprobenumfang = 24). Anmerkung: Aus technischen Gründen konnte die Wurzelbiomasse der 12er Mischung nicht exakt erfasst werden. Pflanzenbilder wurden aus Kutschera, Lichtenegger und Sobotik⁷ entnommen.

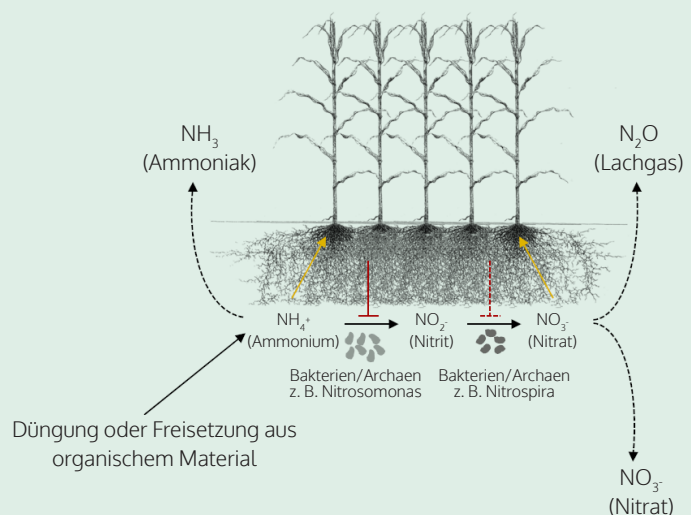
Neben der vergrößerten Aufnahmeoberfläche im Oberboden spielen spezielle Mechanismen zur Erschließung dieser Nährstoffe eine wichtige Rolle. So geben Pflanzen aktiv Wurzelabscheidungen an den Boden ab, um die pflanzenverfügbare Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung zu erhöhen. Organische Säuren und Phenolverbindungen können zum Beispiel Phosphat aus Verbindungen mit Eisen, Kalzium oder Aluminium lösen, während bestimmte Enzyme, sogenannte Phosphatasen, Phosphat aus organischem Material im Boden verfügbar machen^{44,45}. Zur Mobilisierung von Eisen geben Pflanzen Chelatoren ab. Diese binden im Boden vorkommendes Fe^{3+} und transportieren es zur Wurzel^{46,47}. Neben diesen direkten Wirkungen von Wurzelabscheidungen auf die Nährstofferschließung im Boden beeinflussen Pflanzen auch das Bodenmikrobiom zugunsten ihrer Nährstoffaufnahme. Einige Gräser geben zum Beispiel Hemmstoffe gegen die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat im Boden ab, sogenannte Bionitrifikationsinhibitoren (siehe Infobox 6-1). Dadurch verbleibt mehr Stickstoff in Form des weniger auswaschungsgefährdeten Ammoniums im Boden^{48,49}. Leguminosen verbessern über die Symbiose mit Wurzelknöllchenbakterien ihren Stickstoffhaushalt⁵⁰, und Symbiosen mit Mykorrhizapilzen werden von vielen Pflanzenarten aktiv zur Erweiterung der Wurzeloberfläche für die Nährstoffaufnahme forciert. In einer Mischung lassen sich die Nährstoffer-

schließungsstrategien verschiedener Zwischenfruchtarten optimal vereinen. Allerdings muss bei der Zusammensetzung darauf geachtet werden, dass die Mischungspartner eine ähnliche Konkurrenzstärke besitzen. Andernfalls können langsam wachsende Mischungspartner von sich schneller etablierenden unterdrückt werden. Abb. 6-1 zeigt zum Beispiel recht anschaulich wie Gelbsenf und Phacelia die Mischung dominieren und Rauhafer und Alexandrinerklee fast gänzlich am Wachstum hindern. Obwohl in dieser Beispielmischung die Nährstofferschließungspotenziale von Rauhafer und Alexandrinerklee zwar weniger zum Tragen kommen, zeigt die Mischung insgesamt eine ebenso gute Biomassebildung und Aneignung verschiedener Nährstoffe (Abb. 6-2) wie die jeweils besten Reinsaaten⁵¹. Dieses Phänomen konnte über insgesamt acht Versuchsumwelten beobachtet werden. Eine Mischung ist somit im Sinne einer stabilen, bestmöglichen Nährstoffaneignung einer Reinsaat vorzuziehen. Bis zum Ende der Vegetationsperiode können Zwischenfrüchte abhängig von der gewählten Art bzw. Mischung, den Standort- und Witterungsbedingungen sowie dem Aussaatzeitpunkt und dem Management sehr unterschiedliche Mengen an Nährstoffen binden. Diese reichen zum Beispiel von 40 bis 200 kg pro Hektar für Stickstoff und von 5 bis 50 kg pro Hektar für Phosphor, wobei zumeist rund 1/3 in der Wurzel angereichert wird^{51,52}.

WIRKUNG VON BIONITRIFIKATIONSINHIBITOREN

Als Nitrifikation bezeichnet man die mikrobielle Umwandlung von Ammonium zu Nitrat. Dieser Prozess umfasst vier Einzelreaktionen, in denen zuerst Ammonium über zwei Zwischenstufen zu Nitrit und dann weiter zu Nitrat oxidiert wird⁶⁹. In gut durchlüfteten Ackerböden läuft dieser Prozess sehr rasch ab. Zumeist weisen Ackerböden daher 10-100 Mal mehr Nitrat als Ammonium auf⁷⁰, obwohl Pflanzen im Allgemeinen eine Mischernährung aus Ammonium und Nitrat bevorzugen⁷¹. Mitte des 20. Jahrhunderts wurden in natürlichen Beständen des tropischen Grases *Brachiaria humidicola* sehr geringe Stickstoffverluste in Form von Lachgasemissionen und Nitrat- auswaschungen beobachtet. Gleichzeitig fielen recht hohe Ammoniumkonzentrationen im Boden auf. Jahre später konnte dieses Phänomen auf einen sehr potenten Hemmstoff zurückgeführt werden, der die Oxidation von Ammonium zu Nitrit hemmt⁷². Dieser wird von *Brachiaria humidicola* über die Wurzel in den Boden abgegeben und führt dazu, dass Stickstoff vermehrt in Form von Ammonium im Boden vorliegt. Durch seine positive Ladung bindet Ammonium an negativ geladene Bodenpartikel und ist somit weniger auswaschungsgefährdet als Nitrat⁷³. Mittlerweile wurden Bionitrifikationsinhibitoren auch in anderen Gräsern wie Sudangras, Weizen, Mais⁴⁹ und einer Vielzahl weiterer Pflanzenfamilien, zum Beispiel in Kreuzblütlern⁷⁴, Amaryllis-⁷⁵ und Wegerichgewächsen⁷⁶ nachgewiesen.

Der gezielte Einsatz von Hauptkulturen mit nitrifikationsinhibierender Wirkung ist ein aktuell diskutiertes Konzept, um Stickstoffverluste in Form von Lachgasemissionen und Nitrat- auswaschungen während der Vegetationsphase zu mindern⁴⁸. Auch an der Identifizierung von Zwischenfrüchten mit nitrifikationsverzögernden Eigenschaften wird geforscht. Im Idealfall sollte die Entstehung von Nitrat aus dem aus Düngung und organischem Material im Boden freigesetzten Ammonium in zeitlicher und mengenmäßiger Hinsicht dem pflanzlichen Nitratbedarf entsprechen⁶⁹. Pflanzenbilder wurden aus Kutschera et. al (2009)⁷ entnommen.



Infobox 6-1.

Die Nährstoffanreicherung ist dabei das Produkt aus der gebildeten Biomasse und der Nährstoffkonzentration in der Biomasse. Das heißt, dass eine Zwischenfrucht vor allem dann effektiv einen Nährstoff anreichert, wenn sie eine hohe Biomasse und artspezifisch ein hohes Aneignungsvermögen für diesen Nährstoff zeigt. Leguminosen haben zum Beispiel durch ihre Luftstickstofffixierung und damit verbundene Prozesse typischerweise hohe Konzentrationen an Stickstoff, Eisen und Mangan⁵³. Phacelia, Buchweizen, Rüben und Rettich weisen hohe Aneignungsvermögen für Phosphor und Kalzium auf, und Kreuzblütler im Allgemeinen reichern eine hohe Menge an

Schwefel und Bor an (Abb. 6-2)^{54,55}. In einer Mischung aus verschiedenen Zwischenfruchtarten mit unterschiedlichen Nährstoffaneignungspotenzialen können im Vergleich zu Reinsaaten daher insgesamt mehr Nährstoffe in der Biomasse angereichert werden (Abb. 6-2). Dies schließt Nährstoffe ein, die aus der zersetzten Vorfrucht frei werden sowie Nährstoffe, die aus Bodenreserven erschlossen werden. In jedem Fall bietet die Aufnahme in die Biomasse der Zwischenfrucht den Vorteil, dass die Nährstoffe in biologisch verfügbarer Form vorliegen und nach der Zersetzung der Zwischenfrucht für die Folgefrucht besser nutzbar sind als im Boden festgelegte Nährstoffe.

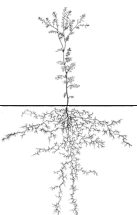
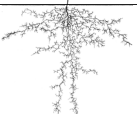
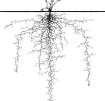
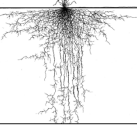
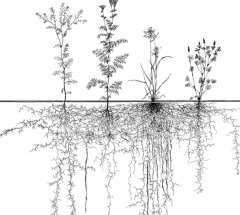
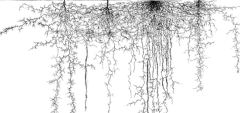
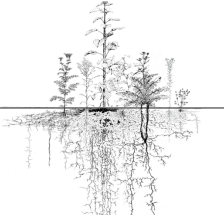
		Nährstoffanreicherung in Sprossen und Wurzeln [kg ha ⁻¹]									
		Stickstoff	Phosphor	Kalium	Kalzium	Magnesium	Schwefel	Eisen	Mangan	Zink	Bor
Senf		51.3	8.1	68.2	44.2	5.0	11.7	0.6	0.09	0.13	0.04
		21.4	9.2	57.6	10.9	3.8	7.3	-	-	0.07	0.03
Klee		44.3	5.5	51.1	22.8	3.6	3.9	1.3	0.11	0.08	0.04
		22.5	3.4	21.8	3.4	2.4	1.9	-	-	0.05	0.02
Hafer		49.7	9.9	78.9	14.1	3.8	5.7	1.2	0.22	0.07	0.01
		17.6	7.0	45.8	12.7	5.8	4.2	-	-	0.22	0.02
Phacelia		47.2	11.2	91.3	74.9	5.3	5.9	0.7	0.13	0.03	0.05
		21.9	14.2	97.0	20.7	4.0	4.7	-	-	0.06	0.04
Mix4		55.8	11.4	90.0	55.0	5.3	9.0	0.9	0.13	0.11	0.05
		40.8	17.8	110.4	22.6	7.3	8.8	-	-	0.15	0.09
Mix12		51.0	8.7	73.2	43.3	4.0	8.5	1.0	0.10	0.06	0.04
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 6-2: Nährstoffanreicherung in Spross- und Wurzelbiomasse verschiedener Zwischenfrüchte in Reinsaaten und in Mischungen. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden über vier Jahre (2015, 2016, 2017, 2019) an zwei Standorten (Asendorf, Niedersachsen und Triesdorf, Bayern) aufgenommen. Die Aussaat erfolgte jeweils zwischen Mitte August und Anfang September. Die Abbildung zeigt den besten linearen unverzerrten Schätzwert für die jeweilige Nährstoffanreicherung (Stichprobenumfang = 24). In den Mischungen ist ein aufsummierter Wert aller Zwischenfruchtbestandteile gezeigt. Die Farbskalen geben jeweils innerhalb eines Nährstoffs den höchsten Wert in rot und den niedrigsten Wert in weiß an (Anmerkungen: Die Anreicherungen von Eisen und Mangan in Wurzeln konnten aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht verlässlich bestimmt werden. Die Anreicherung von Nährstoffen in der Wurzelbiomasse der 12er Mischung konnte aufgrund nicht bestimmbarer Wurzelbiomasse nicht quantifiziert werden). Pflanzenbilder wurden aus KUTSCHERA et al. (2009) entnommen.

6.2 NÄHRSTOFFKONSERVIERUNG

Mit der Aufnahme von Nährstoffen in ihre Biomasse stellen Zwischenfrüchte ein wichtiges Element dar, um Verluste von Restnährstoffen aus der Vorfrucht im Vergleich zu unbegrünten Brachen zu reduzieren^{3,56}. Es zeigen sich allerdings deutliche Unterschiede in der Nährstoffkonservierung im Pflanzenmaterial über den Winter. Sehr kälteempfindliche Arten wie Ramtkraut sterben meist schon im Oktober ab⁵⁷. Durch die dann einsetzende Zersetzung des Pflanzenmaterials gehen bis dahin aufgenommene Nährstoffe nach und nach wieder in den Boden über. Auch frostempfindliche Arten wie Gelbsenf, Phacelia oder Rauhafer zeigen mit dem Einsetzen von Temperaturen unter 0 °C eine langsame Zersetzung des Pflanzenmaterials. Hier gibt es allerdings deutliche Unterschiede, wie die Ergebnisse des CATCHY-Versuchs zeigen (siehe auch Abb. 4-4): Vor allem die Blätter des Gelbsenfs zersetzen sich aufgrund des engen Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N-Verhältnis von 10,5) sehr rasch⁵⁶, da den Bodenmikroorganismen pro umzusetzendem Kohlenstoffatom ausreichend Stickstoff zur Verfügung steht. In der Folge treten deutliche Anstiege der $N_{\min}$ -Gehalte im Boden schon wenige Wochen nach dem ersten Frost auf. Im weiteren Verlauf des Winters kann der Stickstoff in den Unterboden verlagert und ggf. ins Grundwasser ausgewaschen werden^{56,58}. Zudem zeigt Gelbsenf im Vergleich zu anderen Zwischenfrüchten hohe Stickstoffausgasungsverluste⁵⁹. Übrig bleiben nach dem Winter vor allem die schwer zersetzbaren Senfstängel mit sehr weitem C/N-Verhältnis (Tab. 6-1), bei denen der Kohlenstoffumsatz durch Stickstoffmangel verlangsamt ist. Unter dem abgestorbenen Pflanzenmaterial von Phacelia und Rauhafer bildet sich weniger $N_{\min}$ als unter Senf und bis zum Frühjahr sind kaum Stickstoffauswaschungen zu beobachten⁶⁰. Während sich die Rauhaferbiomasse generell langsamer zu zersetzen scheint (erkenn-

bar an einem vergleichsweise niedrigen Unterschied im C/N-Verhältnis vor und nach dem Winter; Tab. 6-1), scheint ein gewisser Teil des aus der Phaceliabiomasse freiwerdenden Stickstoffs in die mikrobielle Biomasse überzugehen und dadurch für einen längeren Zeitraum vor der Verlagerung in tiefere Bodenschichten bewahrt zu bleiben (Daten nicht gezeigt). Winterharte Arten wie Zottelwicke, Inkarnatklee oder Welsches Weidelgras bieten den Vorteil, dass weitaus mehr Nährstoffe über den Winter in der Biomasse gehalten werden können. In einer Studie⁶¹ zeigte sich z. B., dass im Frühjahr unter einem winterharten Landsberger Gemenge 50 % weniger $N_{\min}$ im Boden vorkam als unter abgefrorenen Zwischenfrüchten. Die Kombination von winterharten und abfrierenden Arten kann sinnvoll sein, da früh abfrierende Arten u. a. wichtig für die Nahrungssicherung von z. B. dem Gemeinen Regenwurm (*Lumbricus terrestris*) sind. Dieser hat im Zeitraum von September bis zum einsetzenden Bodenfrost seine aktivste Zeit. Weiterwachsende Arten können hingegen die bereits freiwerdenden Nährstoffe von abgefrorenen Arten nach deren einsetzender Mineralisation wieder aufnehmen und somit vor der Auswaschung schützen^{58,61,62}. Winterharte Zwischenfrüchte sind also im Sinne einer effizienteren Nährstoffkonservierung sinnvoll. Allerdings fallen bei der Nutzung winterharter Zwischenfrüchte zusätzliche Maßnahmen zu deren Abtötung im Frühjahr an⁵⁷ und es kann zu einer Wasserkonkurrenz mit der nachfolgenden Hauptfrucht kommen, worauf in Kapitel 8 näher eingegangen wird. Neben der Stickstoffauswaschung werden auch häufig gasförmige Stickstoffverluste nach der Einarbeitung der Zwischenfrucht im Frühjahr diskutiert, welche vor allem bei der Nutzung von Leguminosen auftreten^{63,65}. Allerdings zeigt eine Metastudie mit über 106 Einzelstudien³, dass der Anbau von Zwischenfrüchten insgesamt zu keiner signifikanten Erhöhung der Lachgasemissionen führt.

Tabbelle 6-1: C/N-Verhältnisse in der Sprossbiomasse von Reinsaatn verschiedener Zwischenfrüchte vor und nach dem Winter 2021/2022 am Standort Asendorf, Niedersachsen (Stichprobenumfang = 3).

ZWISCHENFRUCHTART	C/N-VERHÄLTNIS VOR WINTER	C/N-VERHÄLTNIS NACH WINTER
Senf	20,4	52,7
Klee	13,7	15,9
Hafer	23,0	30,4
Phacelia	24,6	42,9

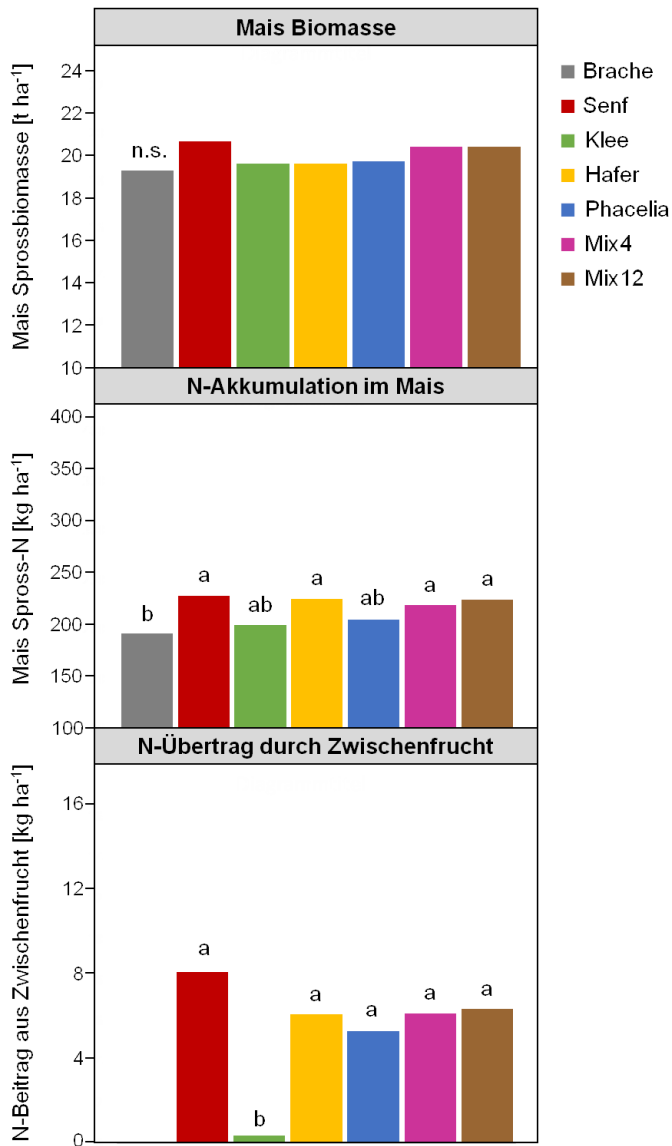


Abb. 6-3: Sprossbiomasse und Stickstoff (N)-anreicherung im Spross von Mais sowie Stickstoffübertrag aus der Sprossbiomasse der Zwischenfrucht auf Mais zur Reife. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden 2018 in Asendorf, Niedersachsen und 2019 in Triesdorf, Bayern, aufgenommen. Die Stickstoffüberträge von der Zwischenfrucht zu Mais wurden mittels der Methode der Stickstoffisotopenmarkierung bestimmt (siehe Infobox 6-2). Die Abbildung zeigt den besten linearen unverzerrten Schätzwert für den jeweiligen Parameter (Stichprobenumfang = 6-12). Unterschiedliche Buchstaben markieren statistisch signifikante Unterschiede nach Tukey's Test bei $p < 0.05$. Bemerkung: Die Stickstoffüberträge sind nur auf Basis der Sprossbiomasse der Zwischenfrüchte berechnet und zeigen nicht den Beitrag des in der Wurzel gebundenen Stickstoffs zur Maisernährung.

6.3 NÄHRSTOFFÜBERTRAG

Die Bezifferung des Nährstoffübertrags an die Folgefrucht ist eine der wichtigsten Fragen bei der Bewertung des Nährstoffmanagements durch Zwischenfrüchte. Und zugleich ist diese Frage die am schwierigsten zu beantwortende. Da unterschiedliche Hauptfrüchte zeitlich

und mengenmäßig unterschiedliche Bedürfnisse an die Nährstoffbereitstellung haben, ist es das Ziel, Zwischenfrüchte bzw. Mischungen so zu gestalten, dass sie genau dann Nährstoffe in adäquater Menge freisetzen, wenn die Hauptfrucht ihre höchsten Nährstoffbedürfnisse hat⁴¹. Durch die Wahl geeigneter Anteile von Leguminosen und Nichtleguminosen sowie winterharten und abfrierenden Arten in Mischungen, lässt sich die Zersetzungsgeschwindigkeit des Zwischenfruchtmaterials den Bedürfnissen der Hauptfrucht anpassen.

Durch die Wahl geeigneter Anteile von Leguminosen und Nichtleguminosen sowie winterharten und abfrierenden Arten in Mischungen, lässt sich die Zersetzungsgeschwindigkeit des Zwischenfruchtmaterials den Bedürfnissen der Hauptfrucht anpassen. Mischungen mit vielen früh abfrierenden Arten bzw. Arten mit engem C/N-Verhältnis setzen dabei eher Nährstoffe frei als Mischungen mit höheren Anteilen an winterharten Arten bzw. Arten mit weitem C/N-Verhältnis. Letztere sind zum Beispiel vor dem Einsatz vor Sommerungen zu empfehlen, die ihren Hauptbedarfszeitraum in den Sommermonaten haben.

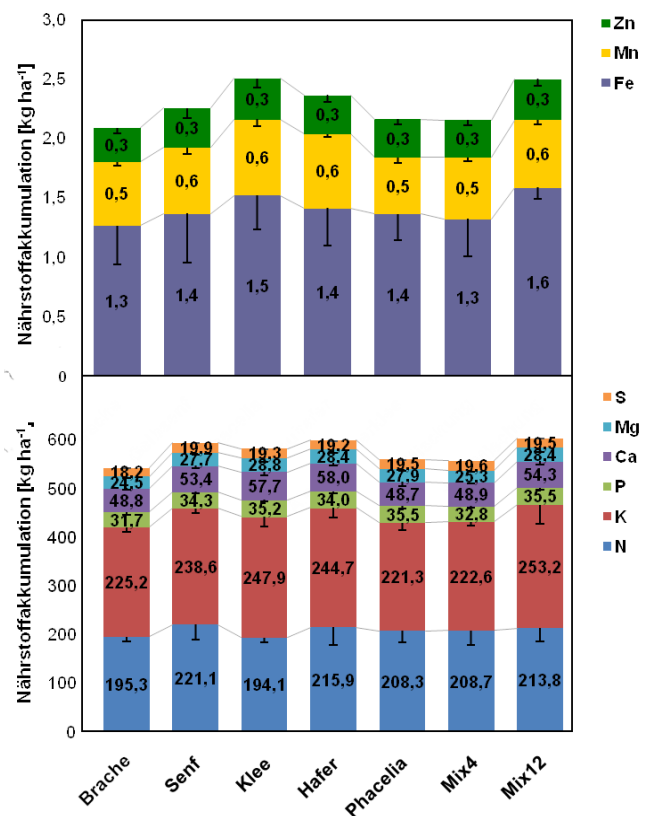
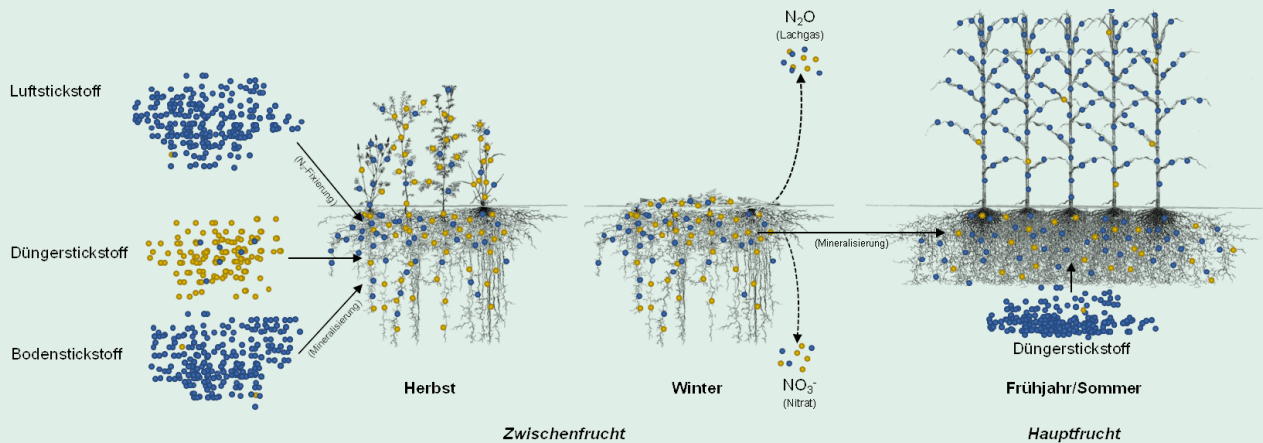
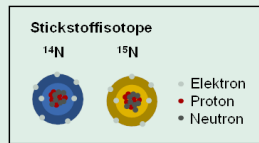


Abb. 6-4: Nährstoffanreicherung in der Sprossbiomasse von Mais nach mehrmaliger Integration von verschiedenen Zwischenfrüchten in eine sich wiederholende Weizen-Zwischenfrucht-Mais-Fruchtfolge. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden nach zwei- (2019) und dreimaliger (2020) Integration von Zwischenfrüchten in die Langzeitrotation am Standort Asendorf, Niedersachsen, aufgenommen. Die Abbildung zeigt den Mittelwert -Standardabweichung (Stichprobenumfang = 9).

DER WEG DES STICKSTOFFS IN DER FRUCHTFOLGE - QUANTIFIZIERT ÜBER DEN NACHWEIS DES STABILEN STICKSTOFFISOTOPS ^{15}N



Um zu quantifizieren, wie viel Stickstoff aus der Zwischenfrucht tatsächlich die Hauptfrucht erreicht und wie viel Stickstoff im Gegenzug im Boden immobilisiert wird oder durch Auswaschung bzw. Ausgasung aus dem sich zersetzenden Zwischenfruchtmaterial verloren geht, kann die Methode der Isotopenmarkierung genutzt werden. Natürlicherweise kommt der Großteil ($> 99\%$) des in der Luft befindlichen Stickstoffs in Form des stabilen Isotops ^{14}N vor, welches jeweils sieben Protonen und Neutronen im Atomkern besitzt. Nur $0,366\%$ des Luftstickstoffs entfallen auf das ebenfalls stabile Isotop ^{15}N , welches noch ein weiteres Neutron im Atomkern trägt. Unter natürlichen Bedingungen kommt also auch der Großteil des später von der Pflanze aufgenommenen Stickstoffs als ^{14}N vor⁷⁷. Für die Methode der Isotopenmarkierung werden Zwischenfrüchte mit Stickstoff gedüngt, in welchem dann das ^{15}N -Isotop in hohen Mengen angereichert ist⁶⁸. Die Menge dieses Isotops im Gesamtstickstoffpool der Zwischenfrüchte kann dann mittels massenspektrometrischer Methoden nachgewiesen werden. Hierbei macht man sich zu Nutze, dass das ^{15}N -Isotop durch ein zusätzliches Neutron im Atomkern schwerer ist als das ^{14}N -Isotop. Beide Isotope lassen sich im Gas verbrannter Pflanzenproben trennen und separat quantifizieren⁷⁷. Mit dieser Analyse kann als Ausgangswert ermittelt werden, wie viel Stickstoff mit welcher ^{15}N -Markierungsintensität im Zwischenfruchtmaterial zum Zeitpunkt der maximalen Biomassebildung vorhanden ist. Interessanterweise zeigen Leguminosen in solchen Experimenten eine niedrigere ^{15}N -Markierungsintensität, da diese Pflanzenfamilie durch Luftstickstofffixierung weniger auf die Aufnahme von Stickstoff aus dem Boden angewiesen ist. Somit reichern Leguminosen mehr des natürlicherweise in der Luft vorkommenden ^{14}N -Isotops als des im experimentell mit dem Dünger zugegebenen ^{15}N -Isotops an⁷⁸.

Nach dem Absterben der Zwischenfrüchte, zum Beispiel mit einsetzendem Frost bei nicht winterharten Zwischenfrüchten, beginnt sich das Pflanzenmaterial zu zersetzen und Stickstoff kann wieder freigesetzt werden. Nun werden in regelmäßigen Abständen Boden- und Gasproben sowie Proben der folgenden Hauptfrucht genommen, um die ^{15}N -Markierungsintensität zu messen. Mit dem Wissen um die Markierungsintensität des Zwischenfruchtausgangsmaterials und der Markierungsintensität in den Boden-, Gas- bzw. Hauptfruchtproben kann schlussendlich quantifiziert werden, wie viel Stickstoff in welche Kompartimente geflossen ist⁷⁷.

Viele Studien nähern sich der Berechnung des Nährstoffübertrags über die Steigerung der Anreicherung eines bestimmten Nährstoffs in der Hauptfrucht im Vergleich zu Kontrollen ohne Zwischenfrucht an. Dabei kann man beobachten, dass der Einsatz von Zwischenfrüchten vor allem auf ökologisch bewirtschafteten Flächen zu einer Steigerung der Nährstoffanreicherung in der Hauptfrucht führt^{66,67}. In der konventionellen Landwirtschaft werden nach einmaligem Einsatz von Zwischenfrüchten kaum Ernährungseffekte auf die Hauptfrucht beobachtet. Häufig werden sogar Mindererträge im Vergleich zu Brache-Kontrollen verzeichnet, da gedüngte Nährstoffe zu einem gewissen Teil während der Zersetzung der Zwischenfruchtreste im Boden immobilisiert werden und somit der Hauptfrucht schwerer zugänglich sind³. Dies gilt speziell für Zwischenfruchtreste mit weitem C/N-Verhältnis, während bei der Zersetzung von Leguminosen-Zwischenfrüchten mit einem höheren Anteil an Stickstoff im Pflanzenmaterial weniger des ausgebrachten Dünger-Stickstoffs von Mikroorganismen verbraucht wird. Somit bergen Leguminosen weniger Gefahr zur Ertragsminderung als Nicht-Leguminosen im Vergleich zu Brachen in konventionellen Fruchtfolgen⁶⁷. Im CATCHY-Versuch wurde mittels der Methode der Isotopenmarkierung (siehe Infobox 6-2) ermittelt, dass nur weniger als 5 % des Stickstoffs, der in der Sprossbiomasse der Zwischenfrucht angereichert wurde, im Folgejahr die Hauptfrucht Mais erreichten (Abb. 6-3). Damit konnten die Stickstoffverluste über den Winter (Abb. 4-4) bei weitem nicht die Differenz zwischen der im Herbst in der Zwischenfrucht befindlichen Stickstoffmenge und dem letztendlichen Transfer zur Hauptfrucht erklären. Eine andere Studie kam ebenfalls zu dem Schluss, dass weniger als 10 % des Stickstoffs, der im Herbst durch die Zwischenfrüchte aufgenommen wurde, im folgenden Jahr direkt an die Hauptfrucht Weizen übertragen wurde. Vielmehr befanden sich nach der Ernte des Weizens noch 26-60 % des Zwischenfrucht-Stickstoffs in 0-30 cm Bodentiefe⁶⁸. Nach schon zwei- bis dreimaliger Integration von Zwischenfrüchten in die sich wiederholende Weizen-Zwischenfrucht-Mais-Rotation des CATCHY-Versuchs, die zeitlich mit reduzierten Düngemittelgaben seit der Novelle der Düngeverordnung 2017 zusammenfielen, konnten Tendenzen für einen Ernährungsvorteil von Mais festgestellt werden (Abb. 6-4). Bei reduziertem Düngereinsatz reicherte die Hauptfrucht Mais interessanterweise vor allem die Nährstoffe in höherem

Maße an, die schon effektiv von der vorangegangenen Zwischenfrucht aufgenommen wurden. So führte zum Beispiel Gelbsenf zur höchsten Steigerung der Stickstoff- und Schwefelanreicherung, während Alexandrinerklee vor allem die Spurennährstoffakkumulation (Eisen, Kupfer, Mangan) im Mais förderte. Es zeigte sich außerdem, dass die artenreiche Zwischenfruchtmischung Mix12 die Anreicherung aller betrachteter Nährstoffe in der Hauptfrucht förderte. Die Ergebnisse legen nahe, dass bei wiederholtem Anbau von Zwischenfrüchten die Stickstoffgabe zu Mais um 10-25 kg pro Hektar reduziert werden könnte, was sehr gut die Richtwerte der Düngeverordnung von 10-40 kg pro Hektar widerspiegelt. Ein bayrisches Langzeitexperiment über 36 Jahre berichtet sogar von Stickstoffeinsparpotenzialen von 51 kg pro Hektar bei Mais, wenn Leguminosen-Zwischenfrüchte regelmäßig in die Fruchtfolge integriert wurden⁸.

Diese Ergebnisse zeigen, dass durch langfristige Nutzung von Zwischenfrüchten je nach Standort und Mischung zum Teil deutliche Einsparpotenziale bei der Düngung der folgenden Hauptkultur möglich sind.

Dabei scheinen Leguminosen durch ihren Stickstoffeintrag eine Schlüsselrolle zu spielen. Durch wiederkehrende Nährstoffeinträge in den Boden werden organische Nährstoffdepots im Boden aufgebaut, aus denen die Folgefrucht zehren kann. Die Folgefrucht profitiert somit nicht nur von der direkt vorangegangenen Zwischenfrucht, sondern von mehreren Zwischenfruchtanbauphasen. Zwischenfruchteffekte verteilen sich damit vielfach auf die gesamte Fruchtfolge.

KURZ GELESEN

- Die Nährstoffaneignung von Zwischenfrüchten erfolgt sehr art-, standort- und managementspezifisch und ist ein Produkt aus der gebildeten Biomasse und der Nährstoffkonzentration.
- Zwischenfruchtmischungen zeigen eine stabilere Biomassebildung und Nährstoffaneignung in verschiedenen Umwelten, wenngleich sie nicht die Erträge der in einer Umwelt besten Reinsaat übersteigen.
- Mischungen zeigen entsprechend ihrer Zusammensetzung sehr unterschiedliche Nährstoffanreicherungen. Die Wahl der richtigen Mischung / deren Zusammensetzung sollte abhängig von Nährstoffbilanz und -freisetzung nach der vorhergehenden Hauptkultur auf dem Standort gewählt werden.
- Winterharte Arten können Nährstoffverluste über den Winter effektiver mindern als abfrierende Arten. Die Kombination von winterharten und abfrierenden Arten kann sinnvoll sein, da früh abfrierende Arten durch Nährstoffeinträge das Bodenleben unterstützen während weiterwachsende Arten die bereits freierwerden Nährstoffe von abgefrorenen Arten wieder aufnehmen können.
- Die Menge und Art der angereicherten Nährstoffe sowie die Zersetzungseigenschaften der Zwischenfrüchte (Abfrierverhalten / Frosttoleranz, C/N-Verhältnis) sind entscheidend für den Nährstoffübertrag an die Folgekultur und sollten dem Zeitpunkt und der Höhe des wesentlichen Nährstoffbedarfs der folgenden Hauptkultur gerecht werden (frühe Freisetzung: früh abfrierende Arten, enges C/N-Verhältnis; späte Freisetzung: winterharte Arten, weites C/N-Verhältnis).
- Positive Effekte auf die Folgekultur sind in hochgedüngten (intensiv genutzten) Pflanzenbausystemen geringer als in extensiver genutzten.
- Effekte treten nicht nur in der folgenden Hauptkultur auf, sondern wirken / verteilen sich vielfach auf die gesamte Fruchtfolge.
- Die langfristige Nutzung von Zwischenfrüchten ermöglicht Düngemittelreduktionen, da durch wiederkehrende Nährstoffeinträge in den Boden organische Nährstoffdepots aufgebaut werden, aus denen die Folgefrüchte zehren können.

Infobox 6-3.

7. Ertragseffekte auf Hauptkulturen

Robin Kümmerer

Die Auswirkungen des Zwischenfruchtanbaus auf die Erträge der nachfolgenden Hauptfrüchte können sehr unterschiedlich sein und hängen von einer Vielzahl komplex ineinandergreifender Faktoren ab, die über unterschiedliche Zeiträume wirken. Zu den langfristigen Einflussfaktoren auf die Ertragsleistung von Hauptfrüchten zählt die Fähigkeit von Zwischenfrüchten, die Erosionsgefahr zu mindern⁷⁹, Kohlenstoff in Form von Humus im Boden zu binden und damit ein Nährstoffdepot aufzubauen sowie dem anthropogen verursachten Klimawandel entgegenzuwirken^{80,81,82,102}. Infolge von Klimaveränderungen werden deutliche Ertragsrückgänge in der landwirtschaftlichen Produktion prognostiziert, die durch den Anbau von Zwischenfrüchten langfristig abgemildert werden können^{83,84}. Auch die Humusanreicherung in landwirtschaftlich genutzten Böden durch den Anbau von Zwischenfrüchten ist ein langfristiger Prozess (siehe Kapitel 4.1), der sich positiv auf die Ertragsfähigkeit der Böden auswirkt⁸⁵.

Mittelfristig kann sich der Zwischenfruchtanbau vor allem auf Faktoren auswirken, die sich am besten unter dem Begriff „Feldhygiene“ zusammenfassen lassen. Damit ist der Einfluss auf Beikrautpopulationen, Schädlinge und Krankheitserreger aller Art gemeint. Während sich der Zwischenfruchtanbau bei den langfristigen Einflussfaktoren gegenüber einer Brache zumeist positiv

auswirkt, sind bei den letztgenannten Faktoren aber auch negative Ertragseffekte möglich. Ein Zwischenfruchtbestand kann nicht nur erfolgreich die Segetalflora unterdrücken sondern damit sogar eine Verringerung des Bodensamenvorrates bewirken^{86,87,88}. Unter ungünstigen Bedingungen oder bei nicht sachgerechtem Anbau der Zwischenfrüchte (z. B. unvorteilhafte Artenwahl, unzureichende Etablierung) kann jedoch auch genau das Gegenteil eintreten. Bei Schädlingen und Krankheitserregern ist die Situation sehr ähnlich⁸⁹. Diese können durch den Anbau von Zwischenfrüchten sowohl gehemmt werden, z. B. sind Zwischenfrüchte oftmals die einzige sinnvolle Möglichkeit zur Bekämpfung von Schadnematoden⁹⁰, als auch gefördert werden, z. B. wenn durch eine ungünstige Artenwahl in Rapsfruchtfolgen die Ausbreitung von Kohlhernie begünstigt wird⁹¹. Kurzfristige Auswirkungen des Zwischenfruchtanbaus auf den Ertrag nachfolgender Hauptfrüchte sind durch eine Beeinflussung der Bodenstruktur, des Wasser- und des Nährstoffhaushaltes möglich^{92,93}. Auch hier sind sowohl positive als auch negative Effekte denkbar. Wenn z. B. Zwischenfrüchte für ihr Wachstum mehr Wasser verbrauchen als durch Niederschläge wieder nachgeliefert wird, ist der Ertragseffekt eindeutig negativ⁹⁴. Durch die Wahl passender Arten, geeigneter Saatzeiten und der rechtzeitigen Abtötung der Zwischenfruchtbestände kann sich der Wasserhaus-

halt für Folgekulturen aber auch verbessern lassen (siehe Kapitel 9). Den Nährstoffhaushalt verbessern Zwischenfrüchte, indem sie Nährstoffe aufnehmen, speichern und wieder mobilisieren. Der Abbau von schwer mineralisierbarer Zwischenfruchtstreu kann jedoch auch zu einer Immobilisierung von Stickstoff und damit zu einer Unterversorgung der Hauptkultur führen (siehe Kapitel 4.2 und 6). Ein relativ neues, aber inzwischen intensiv bearbeitetes Forschungsfeld ist das Mikrobiom an der Schnittstelle Pflanze-Boden. Dass dieses auch durch den Anbau von Zwischenfrüchten nachhaltig beeinflusst werden kann, zeigen eindrucksvoll die Ergebnisse aus dem CATCHY-Projekt (siehe Kapitel 5). Von der Vision einer gezielten Beeinflussung des Mikrobioms durch Zwischenfrüchte („Bioengineering“) und der damit angestrebten Verbesserung von Ertrag und Ertragsqualität landwirtschaftlicher Kulturpflanzen scheint man derzeit jedoch noch weit entfernt^{103,104,105}.

Die Vielfalt möglicher ertragsbeeinflussender Faktoren des Zwischenfruchtanbaus und deren komplexe Wechselwirkungen mit Standort, Witterung und Anbaumanagement erschweren die Zuordnung gemessener Ertragseffekte zu einzelnen Faktoren, deren Prognose und die Ableitung einfacher und genereller Empfehlungen. In der Auswertung von wissenschaftlicher Literatur zum Zwischenfruchtanbau vor der Hauptfrucht Mais zeigt sich ein breites Spektrum an Ertragseffekten. In 66 % der Studien zeigen Zwischenfrüchte einen positiven Effekt auf Silo- oder Körnermaiserträge. Weitere 26 % zeigen keine Ertragseffekte auf Silo- oder Körnermais. Unter den Studien sind aber auch 8 % mit negativen Ertragseffekten von durchschnittlich 8 % geringeren Erträgen. Analog zur Literatursauswertung ergab auch die Auswertung der Silomaiserträge von knapp 2000 im CATCHY-Projekt beprobten Parzellen nur einen geringen Ertragsvorteil von im Mittel 0,8 % durch den Zwischenfruchtanbau. Das klingt zunächst ernüchternd, bedeutet aber im Umkehrschluss auch, dass die vielen Vorteile des Zwischenfruchtanbaus genutzt werden können, ohne Ertragseinbußen hinnehmen zu müssen.

Innerhalb der verschiedenen Zwischenfruchtvarianten gibt es eine breite Streuung der Silomaiserträge. Das bedeutet, dass allein durch die Artenwahl und die Mischungszusammensetzung ein gewisses Optimierungspotenzial für den Zwischenfruchtanbau besteht. Dazu müssen jedoch zunächst die Faktoren identifiziert werden, die die unterschiedlichen Ertragseffekte erklären. Einen großen Einfluss auf die Ertragseffekte der Zwischenfrüchte hatte

im CATCHY-Projekt der Jahresfaktor, der maßgeblich durch die vorherrschenden Witterungsbedingungen bestimmt wird (siehe Kapitel 9). Silomais, der nach Zwischenfruchtmischungen angebaut wurde, brachte im Mittel 1,1 % mehr Ertrag als Silomais, der nach Reinsaat angebaut wurde. Eine mögliche Erklärung hierfür sind die in den Mischungen enthaltenen Leguminosen. In der Literatur wird häufig das C/N-Verhältnis der Zwischenfruchtbiomasse als wichtiger Faktor für Ertragseffekte genannt, da dieses die Mineralisationsraten beeinflusst^{95,96}. Enge C/N-Verhältnisse wie sie bei Leguminosen aufgrund der hohen Proteingehalte vorkommen beschleunigen die Mineralisation, sodass die von der Zwischenfrucht aufgenommenen Nährstoffe bei der späteren Zersetzung der Zwischenfruchtbiomasse schneller pflanzenverfügbar werden. Im CATCHY-Projekt konnte jedoch kein allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Ertrag, der N-Aufnahme oder dem C/N-Verhältnis der Zwischenfruchtsprossmasse und dem Ertrag des nachfolgenden Silomais festgestellt werden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass trotz reduzierter Düngung (siehe Kapitel 1) die Nährstoffversorgung des Silomais nicht so stark limitiert war, dass die Nährstoffnachlieferung aus der Zwischenfruchtbiomasse eine entscheidende Rolle spielte. Letztlich ist das CN-Verhältnis aber nicht die einzige Variable, die die Nährstoffbereitstellung von Zwischenfrüchten erklärt.

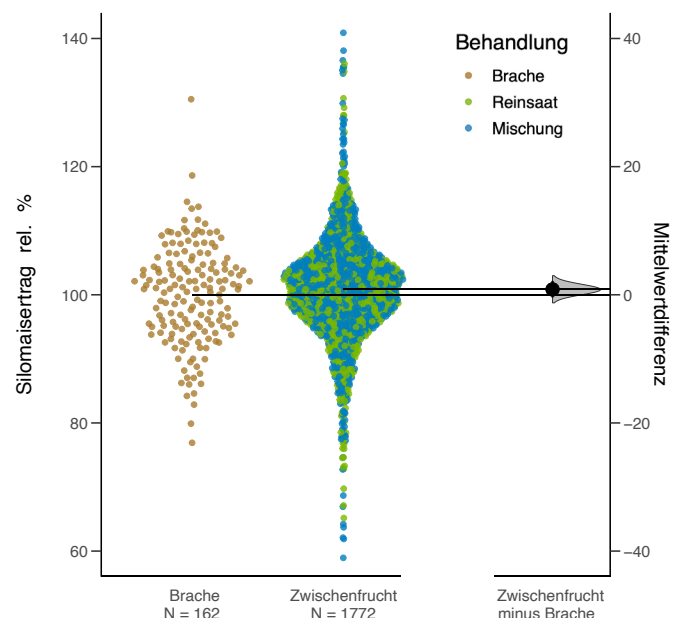


Abb. 7-1: Einfluss von Zwischenfrüchten als Reinsaat oder im Gemenge auf den Ertrag der ersten Folgekultur Silomais im Vergleich zur Brache an den Standorten Triesdorf und Asendorf in den Jahren 2016-2022.

In den meisten Studien werden nur die Ertragseffekte auf die direkt nachfolgende Hauptkultur untersucht und nicht die ganze Fruchtfolge als System betrachtet. Aus

diesem Grund wurde im Rahmen des CATCHY-Projekts ein Langzeitversuch angelegt, in dem die Erträge der gesamten Fruchtfolge untersucht werden und somit auch der Einfluss von wiederholtem Zwischenfruchtanbau sichtbar gemacht werden kann. Auch im Langzeitversuch wurde im Mittel der Jahre ein positiver Effekt der Zwischenfrüchte und insbesondere der Mischungen auf den Silomaisertrag festgestellt. Im Gegensatz dazu führte der Anbau von Zwischenfrüchten vor der Ackerbohne tendenziell zu einem geringeren Ertrag im Vergleich zur Brache (dies ist jedoch statistisch nicht abgesichert). Vor allem die leguminosenreiche 12er Mischung und Klee in Reinsaat wiesen die größten Defizite auf. Dies könnte auf ertragsmindernde Effekte durch Leguminosenmüdigkeit hinweisen. Interessanterweise konnte jedoch der Winterweizen als zweite Hauptkultur nach der Zwischenfrucht mit Ertragssteigerungen zwischen 1 und 4 % von dieser profitieren.

Damit wird deutlich, dass der Ertragseffekt einer Zwischenfrucht auch über die erste Hauptkultur hinaus existiert und, dass zeitliche Unterschiede in den Ertragseffekten der getesteten Arten und Mischungen bestehen. Während Senf beim Silomais die geringste Ertragssteigerung zeigte, ist diese beim Winterweizen deutlich ausgeprägter. Ein Grund dafür könnte in einer verzögerten Mineralisation der Zwischenfruchtbiomasse liegen. Durch die verholzten Stängel des Senfes mit weitem C/N-Verhältnis (siehe Tabelle 6.1) kommt es zunächst zu einer N-Zehrung aus dem Bodenvorrat. Zu weite C/N-Verhältnisse im Boden oder der zugeführten Ernterückstände resultieren in einer geringeren Effizienz der Bodenorganismen bei der Verwertung der organischen Substanz. Bei N Limitierung im Boden kommt es zur Konkurrenz zwischen Pflanzen und Mikroorganismen um schnell verfügbare N-Formen. Die Konsequenz ist eine temporäre N-Fixierung in der mikrobiellen Biomasse und ein Rückgang der N-Aufnahme durch die Pflanze. Beim Winterweizen zeigt sich dann, dass der Effekt der N-Sperre nach einer Senf-Zwischenfrucht nur temporär ist. Sobald die mikrobiellen Zersetzungsprozesse den Punkt der N-Limitierung überwunden haben, wird auch hier wieder N für das Pflanzenwachstum bereitgestellt. Die beiden Mischungen scheinen die Vorteile der enthaltenen Arten zu vereinen und zeigen damit die höchste Ertragssteigerung über beide Hauptkulturen hinweg. Um die Ertragseffekte der Zwischenfrüchte zeitlich noch genauer aufzulösen, wurden im CATCHY-Projekt nicht nur die Erträge, sondern auch die einzelnen Ertragskom-

ponenten wie zum Beispiel Ährendichte und Tausendkorngewicht untersucht. Dabei wird sichtbar, dass die Ertragskomponenten der Hauptfrucht von verschiedenen Zwischenfrüchten individuell beeinflusst werden.

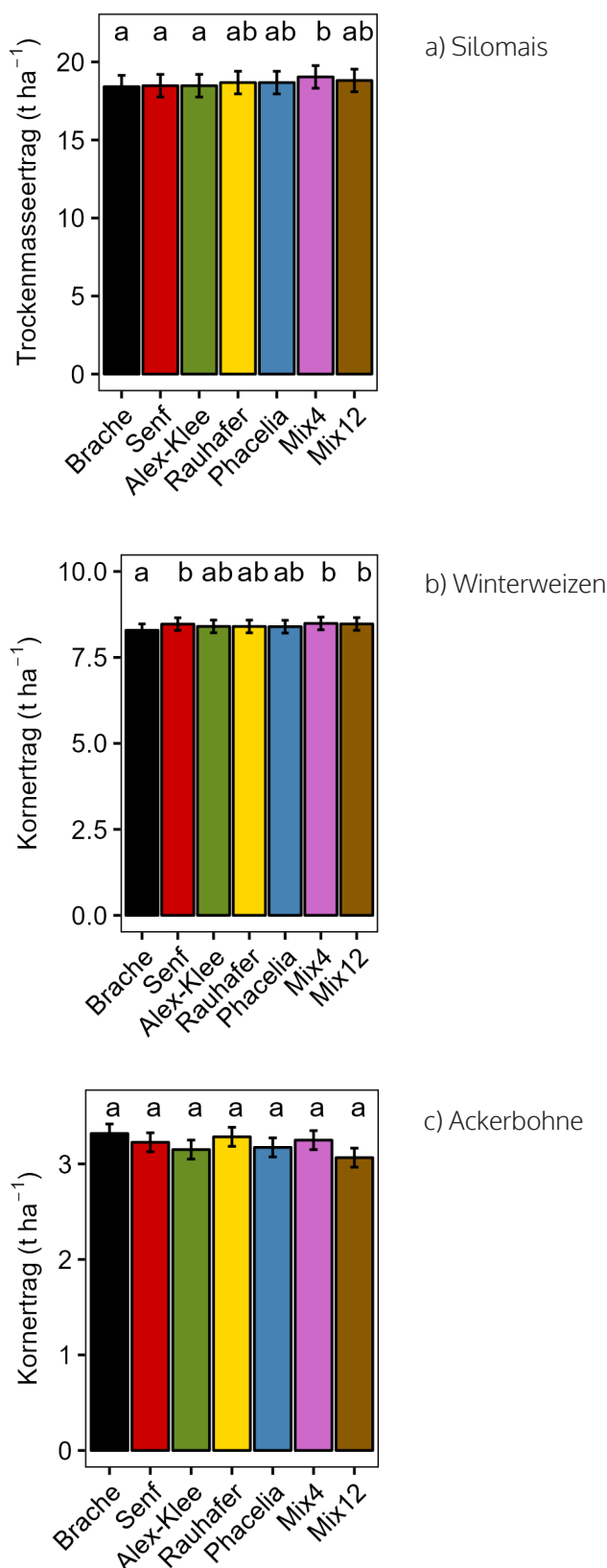


Abb. 7-2: Langzeiterträge (2016 bis 2022) von a) Silomais, b) Winterweizen und c) Ackerbohne. Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede.

Gründe hierfür könnten neben unterschiedlichen Mineralisationsprofilen auch unterschiedliche Einflüsse auf die Bodenstruktur, den Wasserhaushalt oder die Abgabe biochemisch aktiver Substanzen sein. Werden die getesteten Arten in einer Zwischenfruchtmischung kombiniert, scheint es zu einer Überlagerung der ertragsbeeinflussenden Effekte zu kommen, die insgesamt zu einer besseren Leistung der Mischung führt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Anbau von Zwischenfrüchten viele Ertragsfaktoren der Folgekulturen beeinflusst werden, die jedoch oft nicht eindeutig erklärt werden können. Im Mittel waren die

beobachteten Ertragseffekte des Zwischenfruchtanbaus eher gering, was aber auch bedeutet, dass die vielen anderen Vorteile des Zwischenfruchtanbaus ohne Ertragseinbußen genutzt werden können. Durch eine Optimierung des Zwischenfruchtanbaus sollten auch die Ertragseffekte gesteigert werden können. Eine wichtige Rolle scheint die Optimierung des Biomasseabbaus der Zwischenfrüchte zu spielen, z. B. durch Beeinflussung des Verholzungsgrades und der C/N-Verhältnisse. Dies lässt sich durch ein betriebs- und standortspezifisches Anbaumanagement der Zwischenfrüchte erreichen.

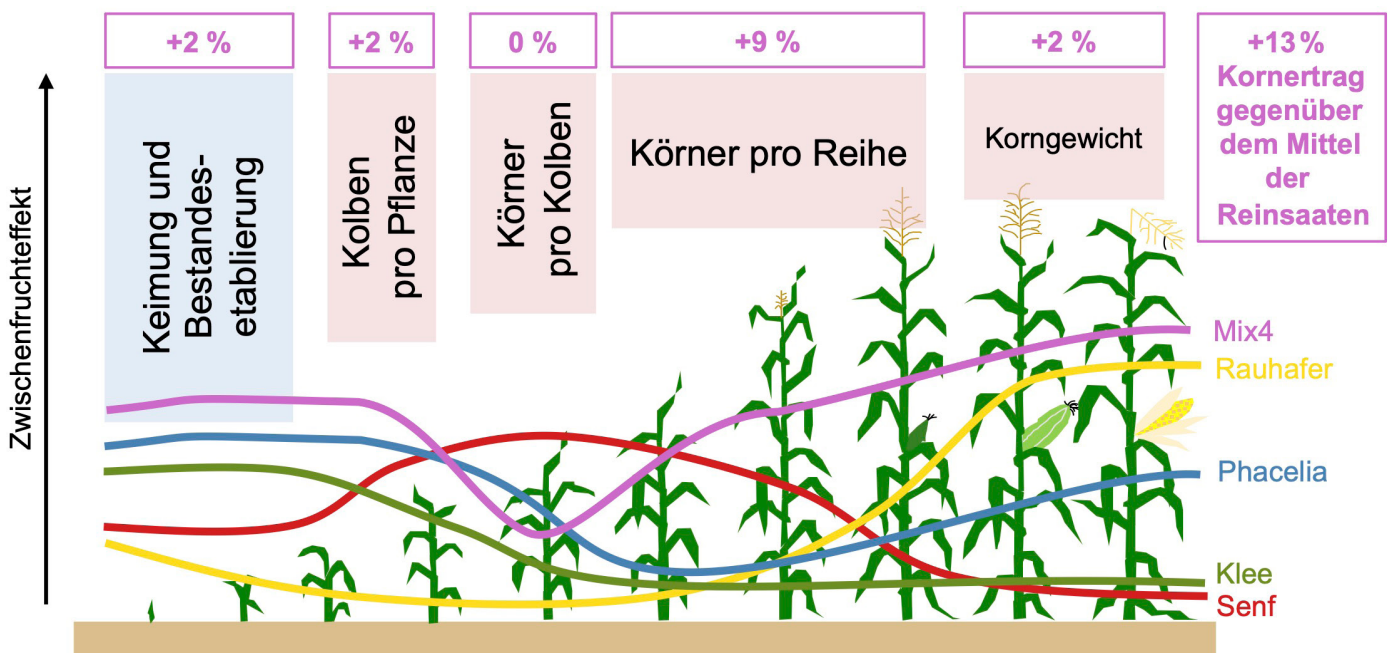


Abb. 7-3: Zeitlicher Verlauf des Einflusses unterschiedlicher Zwischenfrüchte auf die Ertragsbildung von nachfolgend angebautem Silomais.

INFOBOX

KURZ GELESEN

- Der Zwischenfruchtanbau kann unterschiedliche Auswirkungen auf die Erträge der Hauptfrüchte haben, aber insgesamt überwiegen die positiven Auswirkungen und es besteht Optimierungspotenzial.
- Langfristige Ertragsfaktoren sind Erosionsschutz, Bindung von Kohlenstoff im Boden und Anreicherung von nährstoffreichem Humus.
- Mittelfristig kann der Zwischenfruchtanbau Beikrautpopulationen, Schädlinge und Krankheitserreger beeinflussen.
- Kurzfristige Auswirkungen betreffen die Bodenstruktur, den Wasser- und Nährstoffhaushalt.
- Die Artenwahl und Mischungszusammensetzung der Zwischenfrüchte kann den Ertrag der Hauptkultur beeinflussen.
- Die Analyse der Ertragskomponenten gibt Aufschluss über den zeitlichen Einfluss der Zwischenfrüchte auf den Ertrag.

Infobox 7-1.

8. Zwischenfruchtanbau im Klimawandel

Robin Kümmerer, Norman Gentsch, Diana Heuermann

Der Klimawandel in Deutschland wirkt sich regional sehr unterschiedlich aus. Dennoch gibt es allgemeine Trends, die sich in vielen Gebieten beobachten lassen. Regionale Zeitreihenanalysen und Trends lassen sich über die Internetseite des Deutschen Wetterdienst verfolgen⁹⁷. Im Allgemeinen nehmen die Winterniederschläge zu und die Sommerniederschläge ab.

Vor allem in weiten Teilen der östlichen Gebieten (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg) nehmen auch die Frühjahrsniederschläge ab und können in Kombination mit den geringeren Sommerniederschlägen in ausgedehnten Trockenperioden resultieren. Besonders für den Spätsommer wird im mitteleuropäischen Raum eine Häufung von Extremwetterereignissen (Starkniederschläge, anhaltende Trockenperioden mit hohen Lufttemperaturen) prognostiziert. Die Trockenheit erschwert vor allem die Etablierung aber auch das Wachstum von Zwischenfrüchten. Auf diese Entwicklungen müssen sich die Anbaustrategien von Zwischenfrüchten anpassen. Einige Etablierungsstrategien werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Auch die Ausweitung der Vegetationsperiode und zunehmend fehlende Frostereignisse werden sich auf die Art des Zwischenfruchtanbaus auswirken. Gleichzeitig kann der Anbau von Zwischenfrüchten aber auch Ertragsrückgänge durch Umweltstress in den Hauptkulturen mindern.

Durch die Verschiebung der Niederschläge in die Wintermonate ist von einem erhöhten Risiko der Nährstoffauswaschung auszugehen. Ebenso können die erhöhten Winterniederschläge zu einer Destabilisierung der Bodenstruktur führen, was sich nachteilig auf die Produktivität der angebauten Kulturen, die Notwendigkeit von intensiver Bodenbearbeitung und die Anfälligkeit für Wassererosion auswirken kann. Der Zwischenfruchtanbau ist eine effektive Maßnahme, um diesen Risiken entgegenzuwirken, es lohnt sich besonders unter veränderten Klimabedingungen, diesen als pflanzenbauliches Werkzeug einzusetzen.

8.1 ETABLIERUNGSSTRATEGIEN

Um auch unter erschwerten Bedingungen eine sachgemäße Etablierung von Zwischenfrüchten zu erreichen, rückt die Verfolgung der optimalen Bodenbearbeitungs- und Aussaatstrategien unter geeigneten Bedingungen noch mehr in den Fokus. Durch Niederschlagsdefizite fehlt oftmals das zur Etablierung der Zwischenfrüchte benötigte Keimwasser. Auch im Falle einer erfolgreichen Quellung und Keimung der Samen kann ein nachfolgendes Austrocknen des Saathorizontes noch zu einem Absterben der jungen Keimlinge führen bevor diese über ihre Wurzeln Zugang zu Wasser in tieferen Bodenschichten erhalten. Die Folge sind ungleichmäßige Feldauf-

gänge bis hin zu Totalausfällen der Bestände. Ebenso gelingt es unter solchen Bedingungen auch nicht, Ausfallgetreide zum Auflaufen zu bringen, was für eine Bekämpfung notwendig wäre. In den dadurch entstehenden Lücken der Zwischenfruchtbestände kommen bei einer Wiederbefeuchtung der Böden die dann noch vielzählig vorhandenen Samen von Ausfallpflanzen und Segetalflora zur Keimung und nicht erwünschte Pflanzen etablieren sich auf der Fläche (Abb. 8-2).

Der Schlüssel für eine erfolgreiche Zwischenfruchtetablierung liegt darin, die Aussaat so zu gestalten, dass eine zügige und sichere Anfangsentwicklung gesichert ist und gleichzeitig ein signifikanter Vorsprung gegenüber der Segetalflora besteht. Der Aussaat von Zwischenfrüchten sollte also die gleiche hohe Aufmerksamkeit wie den Hauptkulturen geschenkt werden. Unter trockenen Bedingungen spielt die Wahl des Aussaatzeitpunktes eine entscheidende Rolle. Der Boden muss zum Zeitpunkt der Saat und auch in den Tagen danach eine ausreichende Feuchtigkeit aufweisen. In Modellierungen zeigte sich die Anzahl der Tage ohne Niederschlag nach der Aussaat als die einflussreichste Variable auf den Feldaufgang von Zwischenfrüchten⁹⁹. Es gilt also, Ruhe zu bewahren und im Zweifelsfall das Saatgut im Sack zu lassen bis sich wieder akzeptable Bedingungen einstellen. Trockenheit während des Wachstums kann zu einer beschleunigten Entwicklung der Zwischenfruchtpflanzen führen. Dies ist eine Anpassungsreaktion der Pflanzen an die Stresssituation mit dem Ziel, möglichst schnell Nachkommen zu produzieren, um den Fortbestand der Art zu sichern. Das Ergebnis dieser „Notreife“ ist genau das Gegenteil dessen, was mit dem Zwischenfruchtbau angestrebt wird: lichte, schnell gealterte Bestände, die kaum Biomasse bilden und bereits nach kurzer Entwicklungszeit mit dem Eintritt in die generative Phase das Spross- und Wurzelwachstum einstellen. Daher ist auch hier das Potenzial eines frühen Saattermins gegen das Risiko einer Dürre abzuwägen und eventuell ein späterer Saattermin mit niedrigeren Temperaturen, längeren Nächten und ggf. höherer Niederschlagswahrscheinlichkeit abzuwarten.

Die Wahl des Bodenbearbeitungs- und Aussaatverfahrens richtet sich zunächst nach der vorgefundenen Bodenstruktur (Abb. 8-1). Wenn die Bodenstruktur akzeptabel ist und keine Verdichtungshorizonte oder Fahrspuren, die im Frühjahr und bei der Ernte entstanden sind, gelockert werden müssen, können Vorerntesaat oder Direktsaat eingesetzt werden (vgl. Kapitel 2). Damit kann die Vegetationszeit der Zwischenfrucht maximiert und das Brachlie-

gen der Felder minimiert werden. Diese Verfahren sind aber nur dann erfolgreich, wenn genügend Keimwasser zur Verfügung steht, und gerade unter trockenen Bedingungen ist das Etablierungsrisiko bei diesen Verfahren besonders hoch. Hierbei ist automatisch von einem frühen Saattermin auszugehen und daher sind Pflanzenarten für die Zwischenfrucht zu wählen, die frühsaat-tauglich sind und nicht zu schnell generativ werden. Bedarf die Bodenstruktur Korrekturmaßnahmen durch eine Bearbeitung muss auf die klassischen Bestellverfahren Pflugsaat oder Mulchsaat zurückgegriffen werden. Unter trockenen Bedingungen sollte man hierbei Geduld mitbringen und die Nerven bewahren bis Niederschläge fallen, die eine Bearbeitung und Bekämpfung von Unkräutern und Ausfallpflanzen möglich machen, um eine sichere Etablierung des Zwischenfruchtbestands zu erreichen. Unter den beschriebenen Bedingungen stellt sich fast zwangsläufig ein Saattermin nach Mitte August ein und es muss auf spätsaatverträgliche Arten wie Phacelia oder Kreuzblütler zurückgegriffen werden.

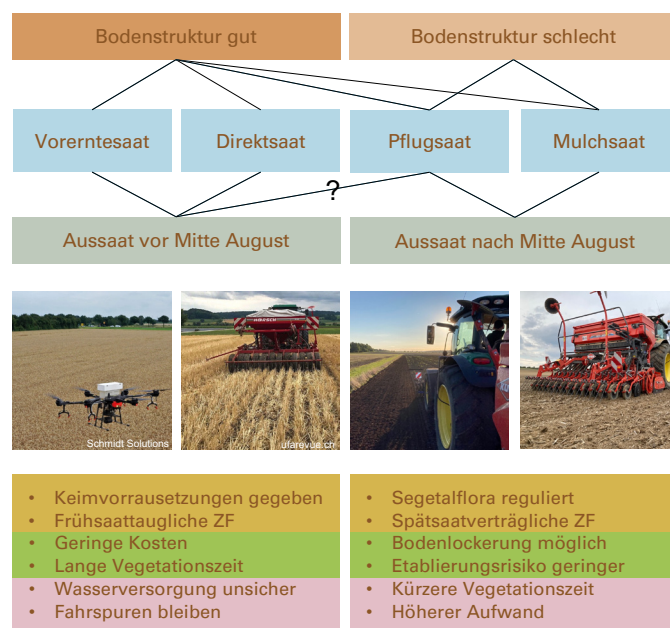


Abb. 8-1: Schema verschiedener Etablierungsstrategien von Zwischenfrüchten und deren Voraussetzungen (gelb), Vor- (grün) und Nachteile (rot).

8.2 ARTENWAHL

Oft wird die Frage gestellt, ob es Arten gibt, die für die oben beschriebenen Bedingungen besonders geeignet sind. Grundsätzlich benötigen alle Pflanzen Wasser zum Keimen und Wachsen, und selbst die widerstandsfähigsten Arten können sich unter manchen bereits beobachteten Bedingungen nicht etablieren. Dennoch gibt es zwischen den zahlreichen Arten, die in den mitteleuro-

päischen Breiten als Zwischenfrüchte angebaut werden, Unterschiede hinsichtlich der optimalen Keimtemperaturen und des Keimwasserbedarfs. Dies wurde durch eine Studie bestätigt, die eine große Anzahl von Arten aus verschiedenen Familien untersuchte und optimale Keimtemperaturen zwischen 21°C und 37°C fand. Die meisten Arten kommen mit relativ hohen Keimtemperaturen zurecht, aber insbesondere bei *Phacelia* und einigen Leguminosen liegen Optimum und Maximum im unteren Bereich. Vor allem Vertreter der Kreuzblütler und Gräser zeigten sich unempfindlich gegenüber Wassermangel und keimten auch bei geringen Wasserpotenzialen⁹⁹. Diese Beobachtungen decken sich auch mit den Erfahrungen aus dem CATCHY-Versuch: Bei knapper Wasserverfügbarkeit während des Wachstums spielt neben einer raschen Bodenbedeckung zur Vermeidung ungenutzter Verdunstung auch die Wassernutzungseffizienz, d.h. die Fähigkeit, aus dem verfügbaren Wasser möglichst viel Trockenmasse zu bilden,

eine wichtige Rolle. Eine hohe Wassernutzungseffizienz zeigen zum Beispiel Senf, Sonnenblume oder Buchweizen. Bei der Bodenbedeckung konnten deutliche Unterschiede zwischen den getesteten Arten festgestellt werden. Die beiden Kreuzblütler Senf und Ölrettich bedeckten den Boden am schnellsten, während die beiden Leguminosen Alexandrinerklee und Erbse den Boden am langsamsten bedeckten. In der Mischung aus Ölrettich und Alexandrinerklee konnten sowohl eine schnelle als auch eine andauernd vollständige Bodenbedeckung erreicht werden.

8.3 GESCHEITERTE ETABLIERUNG

Was aber tun, wenn alle guten Ratschläge befolgt und alle Anstrengungen unternommen wurden und der Zwischenfruchtbestand dennoch klein, ungleichmäßig, mit Fahrspuren durchzogen oder mit unerwünschtem Ausfallgetreide, Ungräsern und Unkräutern durchsetzt ist?

INFOBOX

WARUM „STRESS“ TROCKENHEIT DIE PFLANZEN?

Während ihres gesamten Wachstums sind Pflanzen auf die Versorgung mit Wasser angewiesen. Schon im Samenstadium ist die Anwesenheit von Wasser der wichtigste Auslöser für die Keimung. Das Quellen der Samen führt zu einer Interaktion von gespeicherten Zuckern, Eiweißen und Fetten, um Energie, Enzyme und Baustoffe für wichtige Stoffwechselvorgänge und letztendlich die Keimung bereit zu stellen. Während junge Keimlinge nun eine Zeitlang aus den Reserven des Samens zehren können, gelingt der stabile Aufbau von Pflanzenzellen nur, wenn genügend Wasser einen angemessenen Zellinnendruck entstehen lässt.

Nachdem die Reserven des Samens aufgezehrt sind, müssen Pflanzen sich selbst versorgen. Das geschieht zum einen über die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Boden, zum anderen über die Fixierung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft während der Fotosynthese. Beide Prozesse sind zwingend an eine ausreichende Wasserversorgung gebunden. Viele Nährstoffe, unter ihnen Stickstoff, Kalzium und Magnesium erreichen die Wurzel nur über den Massenfluss, der im Boden zur Wurzel hin entsteht, wenn die Pflanze über die Blätter Wasser transpiriert. Andere Nährstoffe wie Phosphor und Kalium gelangen über Diffusionsprozesse zur Wurzeloberfläche, wenn sich durch deren Aufnahme in die Wurzel kleinräumige Konzentrationsunterschiede ergeben. Diese beiden Mechanismen, Massenfluss und Diffusion, sind die Haupttreiber der Nährstoffbewegung im Boden zur Wurzel hin und werden durch ungenügende Wasserverfügbarkeit stark eingeschränkt⁹⁸. Zudem laufen Mineralisationsprozesse im Boden durch verminderte mikrobielle Aktivität verlangsamt ab, was die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen noch zusätzlich einschränkt. Auf den Fotosyntheseprozess kann Wassermangel gleich auf zwei Arten negativ wirken: Zum einen ist Wasser ein nicht ersetzbarer Ausgangsstoff für Energietransferprozesse während der Fotosynthesereaktion. Zum anderen schließen Pflanzen bei ungenügender Wasserverfügbarkeit ihre Spaltöffnungen, wodurch kein Kohlenstoffdioxid mehr aufgenommen werden kann. Pflanzen unter Wassermangel leiden somit auch unter Nährstoff- und Energiemangel. Außerdem leiden auch pflanzliche Symbionten wie Bakterien und Pilze unter Wassermangel, wodurch deren Nährstoffbereitstellung an die Pflanze oder deren Wirkung gegen Pflanzenschädlinge abnimmt.

Infobox 8-1.

In diesem Fall können folgende Entscheidungshilfen herangezogen werden. Ist abzusehen, dass die Zwischenfrucht keine ausreichende Konkurrenz auf die vorhandene Begleitflora auszuüben vermag, muss ein Umbruch in Betracht gezogen werden, da durch die Ausfallpflanzen die oft ohnehin schon engen Fruchtfolgen weiter verkürzt werden und Unkräuter wie z. B. der weiße Gänsefuß samenreif werden und somit das Unkrautpotenzial für nachfolgende Hauptkulturen erheblich erhöhen. Der Umbruch sollte entweder so früh wie möglich erfolgen, um eine Neuansaat mit eventuell spätsaatverträglichen Arten zu ermöglichen, oder so weit hinausgezögert werden, dass die Fläche als Schwarzbrache in den Winter geht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Samenreife der Begleitflora unbedingt verhindert wird.

Wenn Spuren im Zwischenfruchtbestand sichtbar werden ist das Ausmaß der Verdichtung zu quantifizieren. Wird die Verdichtung noch durchgehend durchwurzelt oder sind die Bedingungen für eine Lockerung grenzwertig, sollte der Zwischenfruchtbestand stehen gelassen werden. Wenn aber keine durchgehende Durchwurzelung in den verdichteten Zonen beobachtet werden kann und sich der Boden in einem bearbeitbaren Zustand befindet, ist eine Lockerung zu empfehlen.



Abb. 8-2: Ungleichmäßiger Zwischenfruchtbestand mit sichtbaren Spuren und nicht unterdrücktem Ausfallgetreide (links). Schlecht etablierte Zwischenfrüchte leisten keine Unterdrückung der Segetalflora und fördern deren Vermehrung (rechts).

8.4 ERTRAGSWIRKUNGEN

Welche Vorteile der Anbau von Zwischenfrüchten für die Erträge der nachfolgenden Hauptfrüchte haben kann, wurde im Rahmen von CATCHY auch in Feldversuchen untersucht. Dazu wurden verschiedene Zwischenfrüchte in eine praxisübliche Fruchtfolge integriert und anschließend Mais angebaut, dessen Ertrag gemessen und mit dem Ertrag nach einer Brache verglichen wurde. In den Jahren 2017 und 2021, in denen dem Mais während des Wachstums ausreichend Wasser zur Verfügung stand, konnte im Mittel kein Ertragseffekt durch den Zwischen-

fruchtanbau beobachtet werden. In den Jahren 2018, 2019 und 2020, in denen der Mais deutlich unter Wassermangel litt, konnte der Silomaisertrag im Mittel um 11 % gegenüber den Brachevarianten gesteigert werden. Die breite Streuung der verschiedenen Arten und Mischungen, die als Zwischenfrucht verwendet wurden, zeigt das Potenzial, welches noch in der Optimierung der Artenauswahl und der Mischungszusammensetzung liegt (Abb. 8-3).

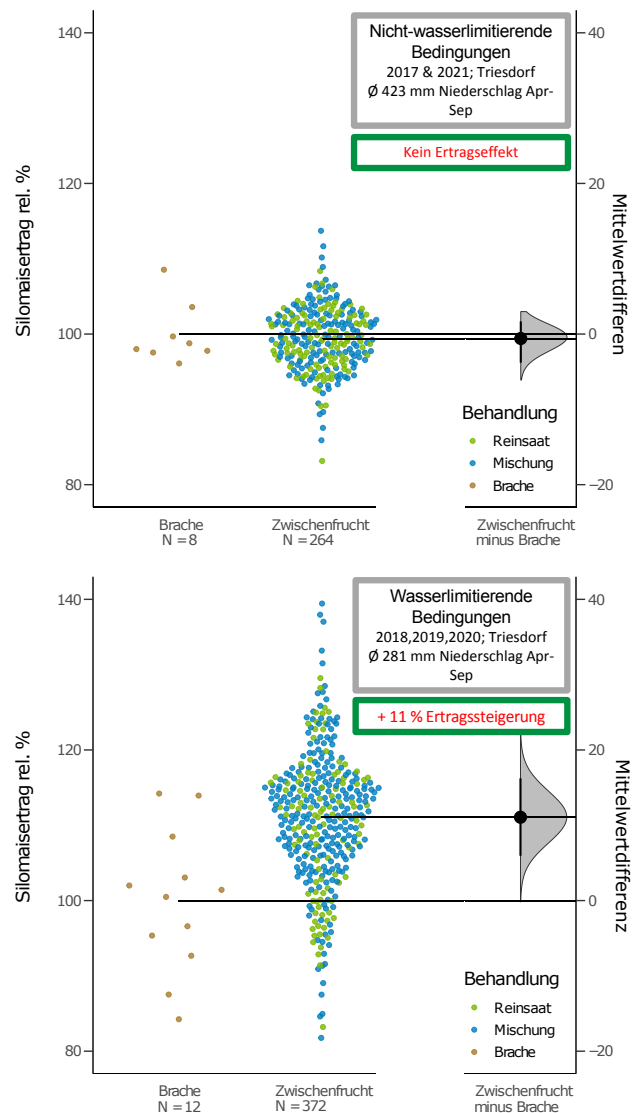


Abb. 8-3: Relativer Silomaisertag nach dem Anbau verschiedener Zwischenfrüchte als Reinsaat und Mischung im Vergleich zu Brache unter nicht-wasserlimitierenden Wachstumsbedingungen des Mais in den Jahren 2017 und 2021 (oben) und unter wasserlimitierenden Wachstumsbedingungen in den Jahren 2018, 2019 und 2020 am Standort Triesdorf.

8.5 KOSTEN ZWISCHENFRÜCHTE DER HAUPTFRUCHT WASSER?

Die Frage ob Zwischenfrüchte der Hauptkultur Wasser kosten ist nicht pauschal zu beantworten. Regionale Standortfaktoren aber auch jährliche Klimaschwankungen erschweren ein einheitliches Bild. Auch die Auswahl

der Zwischenfrucht, ob winterhart oder abfrierend ist ein entscheidender Faktor.

Am Standort Asendorf wurde der Bodenwasserhaushalt über ein Jahr von August 2018 bis August 2019 beobachtet⁵⁶. Alle Zwischenfrüchte des Experiments sind nicht winterhart und der Niederschlag während des gesamten Zeitraums betrug 700 mm. Die Beobachtungen sind in Abbildung 8-4 grafisch dargestellt und in drei Phasen eingeteilt. Für das Zwischenfruchtwachstum (Phase I) benötigen die Pflanzen Wasser aus dem Boden und verringern dadurch den Bodenwasservorrat stärker im Vergleich zu einer Brache. Auf Zwischenfruchtflächen erfolgt der Wasserverlust hauptsächlich über die Transpiration der Pflanzen, während die Evaporation, das heißt die Verdunstung von der dunklen Bodenoberfläche, aufgrund der Pflanzenbedeckung, gering ist. Doch auch auf der Brache kommt es zu Wasserverlust aus dem Boden. Durch die fehlende Bodenbedeckung ist die Evaporation hoch. So lange die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag und Verdunstung) negativ ist findet also auch unter Brache ein kontinuierlicher Wasserverlust statt und der Bodenwasservorrat schwindet. In Abbildung 8.3 leitet die Umkehr von negativer in positive Wasserbilanz die Phase II ein. Anfang Dezember setzen die ersten Nachtfroste

ein, die Zwischenfrüchte stellen ihre Transpiration ein und sterben nach und nach ab. Die Überreste der Zwischenfrüchte bedecken nun den Boden als eine Mulchdecke und reduzieren damit die Evaporation. Dadurch ist die Evaporation der Brache höher als auf den Zwischenfruchtflächen und der Bodenwasservorrat der Brache füllt sich langsamer auf. Bereits Anfang Februar übersteigt der Bodenwasservorrat auf allen Zwischenfruchtflächen die der Brache und blieb bis zum Zeitpunkt der Maisausaat kontinuierlich höher (Senf +4 %, Klee +5 %, Rauhafer +6 %, Phacelia +12 %, Mix4 +14 %, Mix12 +9 %). Nach der Einarbeitung der Zwischenfrüchte und der Maisausaat beginnt Phase III. Während der gesamten Kulturzeit steht den Maispflanzen auf den Zwischenfruchtflächen mehr Wasser aus dem Boden zur Verfügung als unter der Brache. Die Ursache hierfür liegt in dem durch Wurzelaktivität verbesserten Porenvolumen aber auch an einer höheren Aggregatstabilität (siehe Kapitel 4). Der langfristige Einsatz von Zwischenfrüchten führt also zu einer Verbesserung der Bodenstruktur und damit verbunden, zu einer Verbesserung der Wasserhaltekapazität. Eine Erhöhte Wasserhaltekapazität reduziert auch die Sickerwasserverluste. Gerade in Trockenzeiten spiegelt sich die optimierte Wasserverfügbarkeit nach Zwischen-

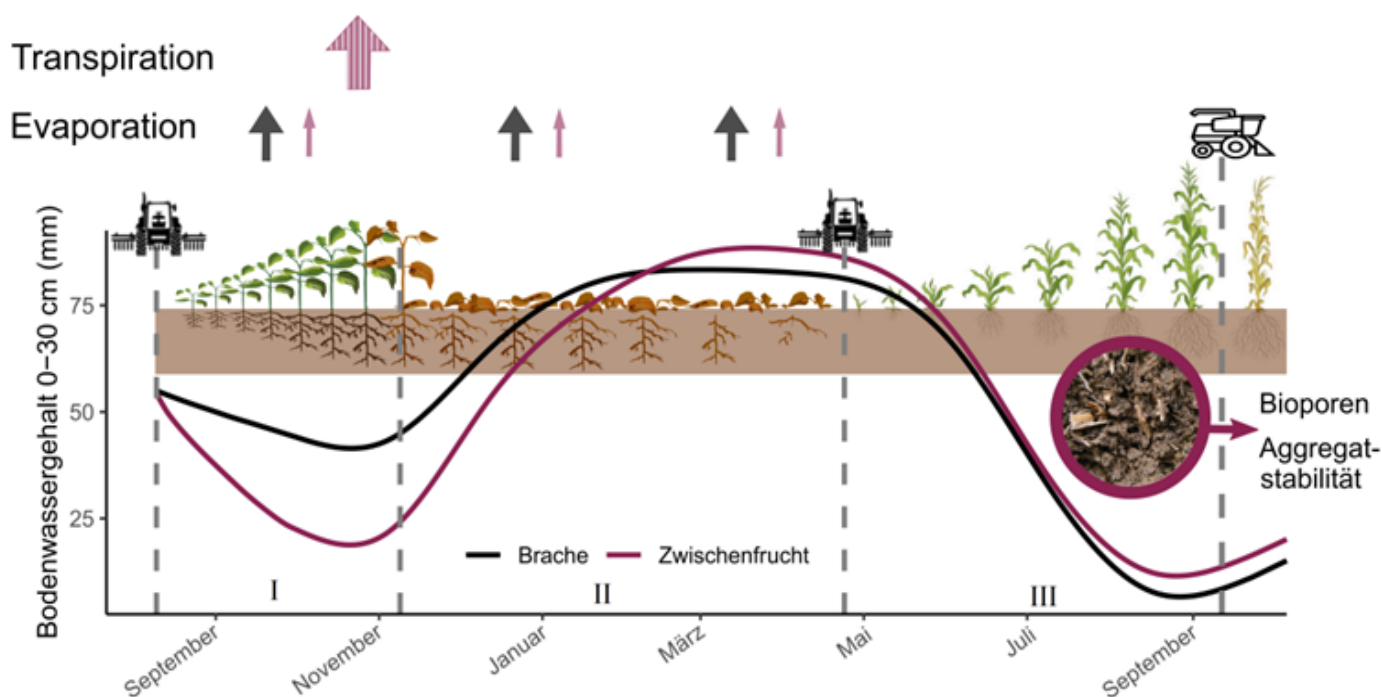


Abb. 8-4: Jahresverlauf des Bodenwassergehalts von der Zwischenfruchtaussaat 2018 bis zur Ernte der Folgekultur 2019. Vertikale Linien (von links nach rechts) markieren Aussaat der Zwischenfrucht 2018, Absterben der Zwischenfrucht 2018, Aussaat des Mais 2019 und Ernte des Mais 2019. Im Vergleich ist der Jahresverlauf einer Brache (schwarze Kurve) dargestellt. Schwarze und lila Pfeile zeigen schematisch die Hauptwasserverlustwege von Brachen und Zwischenfruchtflächen.

früchten in Ertragsvorteilen der Hauptkultur wieder (siehe Abschnitt oben).

Das Transpirationsvermögen der Zwischenfrucht und die damit verbundene Zehrung des Bodenwasservorrats hängt von Art und Aufwuchs der Zwischenfrucht ab. Je mehr Biomasse, desto höher die Transpirationsverluste. Andere Studien zeigen beispielsweise das Senf aufgrund seines hohen Sprossmassebildungsvermögens eine mehr als doppelt so hohe Transpirationsleistung aufweist als Phacelia, Wicke oder Roggen¹⁰⁰. Auch in unseren Ergebnissen spiegelt sich die höhere Wasserzehrung von Senf in den niedrigsten Bodenwassergehalten unter Senf zum Ende der Vegetationszeit wider⁵⁶. Die untersuchten Mischungen zeigten geringere Bodenwasserverluste im Herbst als Reinsaaten.

Als mögliche Ursachen wird ein verbessertes Mikroklima nahe der Bodenoberfläche und eine geringere Evapotranspiration (Evaporation + Transpiration) angenommen. Bei winterharten Zwischenfrüchten oder ausbleiben-

dem Frost geht die Transpiration zwar im Winter auf ein Minimum zurück, steigt jedoch mit verstärkter fotosynthetischer Aktivität im Frühjahr wieder an. Reicht der Winterniederschlag nicht aus um das Defizit der Transpirationsverluste zu kompensieren, besteht die Gefahr, dass der Bodenwasserhaushalt nicht ausreichend aufgefüllt wird. Bei geringen Winterniederschlägen und drohender Frühjahrstrockenheit kann die Biomassebildung und damit die Transpirationsrate durch eine Verschiebung des Saattermins und die Wahl der angebauten Arten reduziert werden. Zusätzlich können Maßnahmen zur Begrenzung des Biomasseaufwuchses wie Walzen, Mulchen oder das Abtöten der Zwischenfrüchte durch Herbizide ergriffen werden, um den Wasserhaushalt zu beeinflussen. Wichtig ist jedoch dabei, dass die Zwischenfruchtstreu auf der Bodenoberfläche verbleiben und nicht eingearbeitet wird. Nur so lässt sich der Mulcheffekt aufrechterhalten und die Verdunstung reduzieren.

9. Wann ist der Zwischenfruchtanbau rentabel?

Jonas Schön, Peter Breunig

9.1 WIE KANN DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS GRUNDSÄTZLICH BEWERTET WERDEN?

9.1.1 DIREKT- UND ARBEITERLEDIGUNGSKOSTENFREIE LEISTUNG (DAKFL)

Die DakfL zeigt die Wirtschaftlichkeit eines landwirtschaftlichen Produktionsverfahrens unter Berücksichtigung der Leistung und aller Direkt- und Arbeiterledigungskosten. Die Direktkosten umfassen Kosten für Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmittel; die Kosten der Arbeiterledigung bestehen aus fixen und variablen Kosten für Lohn/Lohnansatz, Dienstleistungen, Maschinen (Abschreibung, Verschleiß- und Reparaturkosten, Versicherungen etc.) und Betriebsstoffe. Die DakfL unterscheidet sich vom Deckungsbeitrag insbesondere durch die Einbeziehung fixer Arbeiterledigungskosten wie etwa die Abschreibung von Maschinen. D.h. mit der DakfL können beispielsweise auch die Auswirkungen von Veränderungen in der Auslastung von Maschinen durch den Zwischenfruchtanbau wirtschaftlich erfasst werden. Die Eigentumsverhältnisse, Arbeitsmittel (Eigen- oder Fremdmechanisierung) und Arbeitsverfassung (Art der Beschäftigung) bleiben

davon unabhängig. Ebenso unberücksichtigt bleiben die Flächenkosten, Gebäudekosten und allgemeine Kosten der Unternehmensführung. Die DakfL berücksichtigt somit alle relevanten Größen, um ein landwirtschaftliches Produktionsverfahren wie den Zwischenfruchtanbau wirtschaftlich zu beschreiben.

9.1.2 LEISTUNGEN EINER ZWISCHENFRUCHT

Dem Zwischenfruchtanbau können viele positive Effekte auf Klima-, Arten-, Wasser-, und Bodenschutz angerechnet werden. Aber nur wenige dieser Einflussfaktoren sind messbar und können quantitativ belegt werden. Auch ist die Ausprägung dieser Effekte stark von der Art der Zwischenfrucht und der Folgekultur abhängig. Folgende vier Faktoren konnten durch Annahmen aufgrund von Literaturrecherchen getroffen werden:

Ertragssteigerung der Folgekultur

- Zwischenfrüchte steigern den Ertrag der Folgekultur Silomais durch verschiedene Einflussfaktoren um 9 %.
- Die Ertragssteigerung der Folgefrucht kann somit der Zwischenfrucht als Leistung zugeschrieben werden.
- Berechnung: prozentualer Mehrertrag der Folgefrucht $t \text{ TM} / \text{ha} \cdot \text{Marktpreis der Folgefrucht } \text{€} / t \text{ TM}$

Tab. 9-1: Berechnung des Markterlöses durch den Mehrertrag der Folgekultur Silomais.

KULTUR		ZWISCHENFRUCHT
Mehrertrag	t/ha	1,7
Ertragssteigerung	%	9
Preis	€/t	138
Markterlös	€/ha	234

Nährstofflieferung an die Folgekultur (Beispiel Stickstoff)

- Zwischenfrüchte reduzieren das Auswaschen von Nährstoffen über den Winter. Diese stehen dann der Folgekultur zur Verfügung.
- Leguminosen in einer Zwischenfruchtmischung können zusätzlich Stickstoff fixieren.
- Beide Faktoren werden mit dem Preis für Stickstoff multipliziert und stellen als Stickstoffdüngereinsparung eine Gutschrift dar.
- Berechnung: $- \text{kg N} * \text{€ / kg N}$

Tab. 9-2: Berechnung der Leistung durch Nährstofflieferung an die Folgekultur Silomais.

N-Input	kg/ha	-60
N-Preis	€/kg	2,60
N-Kosten	€/ha	-156

Kohlenstoffsequestrierung

- Durch Bewuchs und Gründüngung steigt der Humusgehalt der Fläche und es wird jährlich ca. 1,8 t CO₂/ha in Form von Kohlenstoff im Boden gespeichert.
- Um einen Sicherheitsabschlag im Falle einer Verringerung des Bodenkohlenstoffgehalts zu bewahren, werden 30 % des gebundenen Kohlenstoffs als Puffer einbehalten.
- Die gebundene Menge an CO₂ im Boden wird mit dem Preis von 30 € je t CO₂ und dem Sicherheitsabschlag multipliziert und der Marktleistung zugeschrieben.
- Berechnung: $\text{t CO}_2 / \text{ha} * (1-0,30) * \text{€ / t CO}_2$
- Um hier den Aspekt der Zusätzlichkeit zu bewahren, wird diese Leistung nur auf den Flächenanteil der Zwischenfrucht angerechnet der zusätzlich zu den Verpflichtungen aus GAP23 und DüV angebaut wird.

Tab. 9-3: Berechnung der Leistung durch Teilnahme an Carbon Farming Initiativen.

KOHLENSTOFFSEQUESTRIERUNG	t CO ₂ /ha	1,8
Sicherheitsabschlag	%	30
CO ₂ -Preis	€/t CO ₂	30
Erlös	€/ha	38

Erlös für oberirdische Biomasse

- Der Bewuchs der Zwischenfrucht kann einmalig geerntet werden.
- Die Beerntung hat kaum einen Einfluss auf die Kohlenstoffsequestrierung im Boden, die Nährstofflieferung an die Folgefrucht bleibt jedoch aus und der Ertrag der Folgekultur reduziert sich.
- Berechnung: $\text{Erntemenge in t TM / ha} * \text{Marktpreis € / t TM}$

Tab. 9-4: Berechnung des Markterlöses durch Ernte der oberirdischen Biomasse.

ZWISCHENFRUCHT ERTRAG	t/ha	5
Preis	€/t	125
Markterlös	€/ha	600

9.1.3 KOSTEN EINER ZWISCHENFRUCHT

Der Anbau von Zwischenfrüchten führt neben den vielfältigen Leistungen auch zu Kosten. Hierbei sind die Kosten für die Etablierung gut zu quantifizieren, doch es gibt auch Einflussfaktoren, welche schwieriger zu beziffern sind. Hierzu zählt beispielsweise der zusätzliche chemische Pflanzenschutz für die Abtötung der Zwischenfrucht, bzw. für den zusätzlichen Herbizideinsatz in der Folgekultur. Da dieser abhängig von der Art der Zwischenfrucht, der Folgekultur und dem Betriebsmanagement ist, wurde dieser Aspekt in der hier dargestellten Kalkulation nicht berücksichtigt. Im Folgenden werden daher drei Kostengrößen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung betrachtet:

Erhöhter Nährstoffbedarf für den Mehrertrag

- Der Mehrertrag der Folgekultur führt zu höheren Nährstoffentzügen, die zusätzlich gedüngt werden müssen.
- Der zusätzliche Nährstoffbedarf an Stickstoff, Phosphor und Kalium durch den berechneten Mehrertrag, wird mit den Entzugswerten und den Nährstoffpreisen multipliziert und den Düngekosten hinzuaddiert.
- Berechnung: $\% \text{ Mehrertrag} * \text{t / ha Ertrag} * \text{Entzugsfaktor N,P,K} * \text{€ / kg N,P,K}$

Tab. 9-5: Berechnung der zusätzlichen Düngekosten durch den Mehrertrag der Folgefrucht Silomais mittels der Entzugsfaktoren.

MEHRERTRAG	t/ha	5,4	MEHRERTRAG	t/ha	5,4	MEHRERTRAG	t/ha	5,4
N-Entzugsfaktor	kg/t	4,3	P-Entzugsfaktor	kg/t	1,6	K-Entzugsfaktor	kg/t	5,10
N-Menge	kg/ha	23,22	P-Menge	kg/ha	8,64	K-Menge	kg/ha	27,54
N-Preis	€/kg	2,6	P-Preis	€/kg	1,2	K-Preis	€/kg	1,50
N-Kosten	€/ha	60,37	P-Kosten	€/ha	10,37	K-Kosten	€/ha	41,31

Saatgutkosten

- Die Menge an benötigtem Saatgut wird mit dem Preis des Saatguts multipliziert und den Saatgutkosten zugeteilt.
- Berechnung: $\text{kg/ha} \cdot \text{€/kg}$

Tab. 9-6: Berechnung der Saatgutkosten für den Zwischenfruchtanbau.

Saatgutmenge	kg/ha	25
Preis	€/kg	2,50
Saatgutkosten	€/ha	63

Zusätzliche Kosten zur Arbeitserledigung (Lohn, Maschinen, Diesel)

- Kosten zur Bestellung der Zwischenfrucht
- Die benötigte Arbeitszeit, der Maschineneinsatz und Kraftstoffverbrauch zur zusätzlichen Bodenbearbeitung und Aussaat mittels Drillmaschine im Herbst wird mit den jeweiligen Kosten multipliziert und den Kosten der Arbeitserledigung zugeschrieben.
- Berechnung: $\text{AKh} \cdot \text{€/h} + \text{L/h} \cdot \text{€/l} + \text{Makost/ha}$

Tab. 9-7: Berechnung der Arbeitserledigungskosten für die Etablierung der Zwischenfrucht.

Arbeitskraftstunden	h/ha	3,7
Stundenlohn	€/h	19
Lohn	€/ha	70
Kraftstoffbedarf	l/ha	40
Kraftstoffpreis	€/l	1,20
Kraftstoffkosten	€/ha	48
Maschinenkosten	€/ha	44
Arbeitserledigungskosten	€/ha	162

9.1.4 SPREIZUNG DER EINFLUSSFAKTOREN

Die oben genannten Faktoren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus unterliegen einer gewissen Spannbreite. Die angegebenen Werte entsprechen den aktuellen Mittelwerten, können aber betriebsindividuell, sowie witterungsabhängig stark variieren. Folgende Tabelle zeigt die Spannbreiten der einzelnen Einflussfaktoren.

Tab. 9-8: Spreizung bestimmter Einflussfaktoren der Wirtschaftlichkeitsberechnung.

EINFLUSSFAKTOR	MIN	MAX	EINHEIT
Ertragssteigerung der Folgekultur	-5,00	15,00	%
Marktpreis Silagegut	80,00	140,00	€/t
Stickstofflieferung an Folgekultur	30,00	60,00	kg N/ha
Stickstoffpreis	0,65	2,80	€/kg
Kohlenstoffsequestrierung	0,80	1,70	t CO ₂ /ha
Ertrag Zwischenfrucht	3,00	8,00	t TM/ha
Phosphorpreis	0,50	1,30	€/kg
Kalipreis	0,55	1,50	€/kg
Saatgutkosten	25,00	125,00	€/ha
Kraftstoffpreis	0,80	1,60	€/l

Die Ertragssteigerung der Folgekultur weist eine sehr große Spannbreite auf und kann sich auch negativ auswirken. In nassen Jahren ist die Steigerung des Ertrags gegenüber der Brache kaum bis gar nicht gegeben, in trockenen Jahren hingegen ist die Steigerung umso höher ausgeprägt. Die Bodenbearbeitung zur Aussaat der Hauptkultur spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Wird bei zu nassen Bedingungen bearbeitet oder wird die Bodenbearbeitung in trockenen Jahren nicht wasserschonend durchgeführt, hat dies negative Auswirkungen auf den Ertrag.

Der Marktpreis für die Silage steht in Abhängigkeit zu den Getreidepreisen und unterscheidet sich auch zwischen den Regionen teils erheblich.

Die Stickstofflieferung der Zwischenfrucht an die Folgekultur unterliegt vielen Einflussfaktoren (siehe Kapitel 6). Zum einen hat die Zusammensetzung der Zwischenfrucht einen großen Einfluss darauf, hier spielen Leguminosen zur Bindung des Stickstoffs eine wichtige Rolle. Aber auch Gräser oder andere überwinternde Komponenten, können die vorhandenen Nährstoffe im Herbst aufnehmen und in der Biomasse gespeichert vor dem Auswaschen schützen. Einen weiteren Einfluss hat der Zeitpunkt der Abtötung der Zwischenfrucht bzw. der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung im Frühjahr, da ab diesem Zeitpunkt die Mineralisierung des Zwischenfruchtmaterials und damit eine Freisetzung des darin enthaltenen Stickstoffs beginnt. Daher sollte je nach Zwischenfruchtart und Folgekultur die Bodenbearbeitung nicht zu früh durchgeführt werden. Auch durch die Witterung kann die Stickstofflieferung variieren. Durch viel Niederschlag besteht die Gefahr, dass Nährstoffe in tiefere Bodenschichten ausgewaschen werden und nicht mehr pflanzenverfügbar sind. Bei niedriger Bodentemperatur verzögert sich die Stickstoffmineralisation und der Nährstoff steht erst später, bzw. erst der zweiten Folgekultur zur Verfügung. Der Zeitpunkt an dem der gespeicherte Stickstoff zur Verfügung gestellt wird ist ebenfalls vom C/N-Verhältnis der Zwischenfrucht abhängig, je stärker eine Zwischenfrucht verholzt, desto länger dauert die Mineralisation.

Die Nährstoffpreise für Stickstoff, Phosphor und Kali unterliegen den Börsenpreisen für Nährstoffen und können dementsprechend variieren.

Der Humusaufbau und somit die Kohlenstoffsequestrierung im Boden findet durch die Bindung des Kohlenstoffs der Pflanze aus der Luft während der Fotosynthese statt (siehe Kapitel 5). Je länger die Vegetationsperiode und je

höher die Fotosyntheserate der Zwischenfrucht ist, desto mehr Kohlenstoff kann sequestriert werden. Grundsätzlich binden Gräser mehr Kohlenstoff als zum Beispiel Leguminosen. Durch eine Bearbeitung des Bodens geht allerdings wieder Kohlenstoff verloren. Die angegebenen Werte beinhalten bereits einen Permanenz-Puffer von 30 %. Die Kosten für das Saatgut der Zwischenfrucht variieren zwischen den Komponenten erheblich, besonders Leguminosen und Gräser zur Beerntung liegen hier im oberen Bereich der Spannweite. Die Kosten für den verbrauchten Kraftstoff sind abhängig von den Rohölpreisen, welche ebenfalls starken Schwankungen unterliegen.

9.2 WIRTSCHAFTLICHKEIT DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS VON TYPISCHEN BETRIEBEN IN SÜDDEUTSCHLAND

Im CATCHY-Projekt wurde anhand von "typischen Betrieben", die nach dem Standard Operating Procedure von agri benchmark¹⁰¹ etabliert wurden, eine Kalkulation der Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus durchgeführt. Agri benchmark ist ein globales, gemeinnütziges Netzwerk von Agrarökonomen, Beratern, Produzenten und Spezialisten in Schlüsselsektoren der Wertschöpfungskette. Das Netzwerk nutzt international standardisierte Methoden zur Analyse von Betrieben, Produktionssystemen und deren Rentabilität.

Jeder typische Betrieb besteht aus einem Datensatz, der diesen im Detail beschreibt. Er ist in einer definierten Region angesiedelt, besitzt eine für diese Region typische Faktorausstattung (Land, Arbeit, Kapital) und wirtschaftet mit einem für diese Region typischen Anbausystem.

In gemeinsamen Gruppendiskussionen mit Landwirten, Fachberatern und Partnern aus der Wissenschaft, haben wir folgende drei typische Betriebe für Süddeutschland etabliert:

Unterfranken - Ackerbaubetrieb

- 240 ha Ackerfläche
- Fruchtfolge: Winterweizen - Zwischenfrucht - Zuckerrübe - Winterweizen - Silomais/Sojabohne/Sommergerste

- 30 % der Fläche im Roten bzw. Gelben Gebiet

Mittelfranken - Milchviehbetrieb mit Biogasanlage

- 160 ha Ackerfläche
- Fruchtfolge: Silomais - Winterweizen/Triticale - Zwischenfrucht - Silomais - Wintergerste - Zwischenfrucht

- 60 % der Fläche im Roten bzw. Gelben Gebiet Oberpfalz - Milchviehbetrieb
- 110 ha Ackerfläche
- Fruchtfolge: Dinkel/Winterweizen - Zwischenfrucht - Silomais - Winterweizen - Wintergerste/Erbsen - Winterraps
- 25 % der Fläche im Roten bzw. Gelben Gebiet

9.3 POTENZIALE ZUR STEIGERUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DURCH AUSDEHNUNG DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wird in folgende vier Stufen unterteilt:

Stufe 1: IST-Zustand

- Zwischenfruchtanbau entspricht dem gesetzlichen Minimum nach GAP23 und der Düngeverordnung

Stufe 2: Maximum an Zwischenfruchtanbau

- Zwischenfruchtanbau entspricht dem maximal pflanzenbaulich Möglichen

Stufe 3: Maximum plus Carbon Farming

- Wie Stufe 2 aber mit Einbeziehung ökonomischer Effekte durch die Teilnahme an privatwirtschaftlichen Carbon Farming Initiativen

Stufe 4: Maximum plus Carbon Farming plus Nutzung des Aufwuchses

- Wie Stufe 3 aber mit Einbeziehung ökonomischer Effekte durch die Nutzung der oberirdischen Biomasse

Nach der GAP23 dürfen maximal 20 % der Ackerfläche über den Winter brach liegen. Bei einem Sommerungen-Anteil von über 20 % ist hierbei zu beachten, dass diese Flächen über den Winter begrünt sein müssen. Bei unserer Kalkulation wird diese Begrünung durch den Anbau von Zwischenfrüchten gewährleistet. Nach der Düngeverordnung muss bis auf wenige Ausnahmen im Roten bzw. Gelben Gebiet vor jeder Sommerung, die mit Stickstoff (Rotes Gebiet) oder Phosphor (Gelbes Gebiet) gedüngt werden soll, eine Zwischenfrucht angebaut werden. Diese Vorgaben werden in allen vier Stufen unter Betrachtung des Anteils am Roten bzw. Gelben Gebiet berücksichtigt.

9.3.1 ANNAHMEN ZU DEN BERECHNUNGEN

Bei Leguminosen als Folgefrucht einer Zwischenfrucht wird angenommen, dass in der Zwischenfruchtmischung keine Leguminosen enthalten sind, somit kann kein Stickstoff gebunden werden, was die Nährstofflie-

ferung durch die Zwischenfrucht somit um 30 kg / ha N reduziert.

Bei Stufe 3 wird wie in Stufe 2 vor jeder Sommerung eine Zwischenfrucht angebaut. Außerdem wird mit der Zwischenfruchtfläche, die zusätzlich zu Stufe 1 angebaut wird, an privatwirtschaftlichen Carbon Farming Initiativen teilgenommen. Durch den Bewuchs der Fläche über den Winter und anschließenden Gründüngung wird dem Boden Kohlenstoff zugeführt (siehe Kapitel 5). Der Kohlenstoff wird somit aus der Atmosphäre entzogen und im Boden als Humus gespeichert. Die Anreicherung des Bodenkohlenstoffs in landwirtschaftlich genutzten Flächen wird auch als Carbon Farming bezeichnet. Durch die Sequestrierung des Kohlenstoffs im Boden können daraus durch privatwirtschaftliche Zertifizierungsunternehmen CO₂-Zertifikate generiert werden, welche dann von Unternehmen oder privaten Personen erworben werden, um deren CO₂-Emissionen zu kompensieren. Die Teilnahme an Carbon Farming Initiativen mit verifizierten Standards schreiben eindeutige Kriterien vor. So kann zur Gewährung der Zusätzlichkeit nur mit dem Flächenanteil des Zwischenfruchtanbaus daran teilgenommen werden, der zusätzlich zur bereits gesetzlich geforderten Anbaufläche angebaut wird. Mit der ursprünglichen Anbaufläche aus Stufe 1 kann somit nicht daran teilgenommen werden.

Der Entzug der oberirdischen Biomasse bei Stufe 4 führt aufgrund einer meist verspäteten Aussaat und fehlendem Wasser zu einer Ertragsreduktion der Folgefrucht. Da für die abgeerntete Biomasse keine Entzugsdüngung stattfindet, wird angenommen, dass diese Zwischenfrucht der Folgekultur keine zusätzlichen Nährstoffe liefert. Durch die Reduktion des Ertrags benötigt die Hauptkultur im Vergleich zu den anderen Stufen weniger Nährstoffe, was durch die Düngereinsparung zu Einnahmen bei den Düngekosten führt. Der Marktpreis für die oberirdische Biomasse versteht sich für stehend ab Feld, somit verursacht dieses Verfahren keine zusätzlichen Kosten der Arbeitserledigung.

9.4 ERGEBNISSE

9.4.1 UNTERFRANKEN - ACKERBAUBETRIEB

Folgende Tabelle zeigt die Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus vor Silomais des typischen Betriebs für die Region Unterfranken je Hektar in Abhängigkeit der vier Stufen.

Tab. 9-9: Kalkulation der DakfL des Zwischenfruchtanbaus vor Silomais in Abhängigkeit der vier Stufen beim Unterfranken Betrieb.

		STUFE 1	STUFE 2	STUFE 3	STUFE 4	
Mehrertrag		1,7	1,7	1,7	-2,9	t/ha
Ertragssteigerung Folgefrucht		9,0 %	9,0 %	9,0 %	-15,0 %	%
Erzeugerpreis		138	138	138	138	€/t
Zwischenfrucht Ertrag					5	t/ha
Erzeugerpreis					125	€/t
Kohlenstoff-Sequestrierung				1,26	1,26	t CO ₂ /ha
CO ₂ -Preis				30	30	€/t CO ₂
Marktleistung		238	238	275	242	€/ha
Saatgutkosten		63	63	63	120	€/ha
N-Input Mehrertrag		23	23	23	-39	kg/ha
N-Lieferung Zwischenfrucht		-60	-60	-60	0	kg/ha
N-Kosten	2,60	-96	-96	-96	-101	€/ha
P-Input Mehrertrag		9	9	9	-14	kg/ha
P-Kosten	1,20	10	10	10	-17	€/ha
K-Input Mehrertrag		28	28	28	-46	kg/ha
K-Kosten	1,50	41	41	41	-69	€/ha
Düngerkosten		-44	-44	-44	-187	€/ha
Direktkosten		19	19	19	-67	€/ha
Lohnkosten		70	70	70	70	€/ha
Maschinenkosten		44	44	44	44	€/ha
Dieselskosten		48	48	48	48	€/ha
Kosten der Arbeitserledigung		162	162	162	162	€/ha
Direkt- & arbeitserledigungskostenfreie Leistung		56	56	94	147	€/ha

Der Mehrertrag der Folgefrucht hat mit einer zusätzlichen Marktleistung von 238 €/ha die größten positiven Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus. Aber auch die Nährstofflieferung an die Folgekultur reduziert bei den angenommenen hohen Düngermittelpreisen die Direktkosten um 156 €/ha erheblich. Da die Beerntung der oberirdischen Biomasse negative Auswirkungen auf den Ertrag hat und keine Nährstoffe an die Folgekultur liefert, sinken dadurch die Leistungen. Doch durch die Erlöse des Futtermittelsverkaufs und der reduzierten Düngung hat dieses Szenario

positive Auswirkungen auf die DakfL. Die Teilnahme an Carbon Farming Initiativen hat mit 38 €/ha ebenfalls einen stark positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit des Anbaus, doch muss hierbei berücksichtigt werden, dass aufgrund der Zusätzlichkeit nur mit 40 % der Fläche daran teilgenommen werden kann. Die DakfL von Zwischenfrüchten mit der Folgekultur Silomais befindet sich bei allen vier Szenarien mit 56 €/ha bis 147 €/ha im stark positiven Bereich. Bei Betrachtung der gesamten Fruchtfolge, berechnet für die gesamte Anbaufläche, ergeben sich daraus folgende Ergebnisse:

Tab. 9-10: Kalkulation des Zwischenfruchtanbaus für die gesamte Fruchtfolge und gesamte Anbaufläche des Unterfranken Betriebs.

DakfL ZWISCHENFRUCHT	PRO ha	PRO BETRIEB	DakfL GESAMT	DIFFERENZ DakfL	FLÄCHE ZWF
Stufe 1	70,44 €	4.764,56 €	367.846,55 v	- €	72
Stufe 2	70,44 €	9.990,64 €	373.072,63 €	5.226,08 €	120
Stufe 3	78,00 €	11.805,04 €	374.887,03 €	7.040,48 €	120
Stufe 4	86,07 €	12.449,88 €	375.531,87 €	7.685,32 €	120

Bei Stufe 1 und 2 ist die durchschnittliche DakfL je Hektar identisch. Gesamtbetrieblich betrachtet steigert sich die DakfL der Zwischenfrüchte durch die Ausdehnung des Anbaus von 72 ha auf 120 ha um 5.226,08 € auf 9.991,64 €. Die DakfL je Hektar bei Stufe 3 und 4 verringern sich im Vergleich zur Tabelle oben, da hier aufgrund der Zusätzlichkeit nur auf 40 % der Zwischenfruchtfläche an Carbon Farming Initiativen teilge-

nommen werden kann. Gesamtbetrieblich betrachtet steigert die Teilnahme an Carbon Farming Initiativen die DakfL um 1.814 € gegenüber Stufe 2. Die Beerntung der Zwischenfrüchte kann bei dieser Fruchtfolge aufgrund des Saatzeitpunkts der Folgekultur nur vor Silomais und Sojabohnen durchgeführt werden. Hierbei erhöht sich die durchschnittliche DakfL je ha auf 86,07 €/ha.

Tab. 9-11: Kalkulation der DakfL des Zwischenfruchtanbaus vor Silomais in Abhängigkeit der vier Stufen beim Mittelfranken Betrieb.

		STUFE 1	STUFE 2	STUFE 3	STUFE 4	
Mehrertrag		1,4	1,4	1,4	-2,4	t/ha
Ertragssteigerung Folgefrucht		9,0 %	9,0 %	9,0 %	-15,0 %	%
Erzeugerpreis		138	138	138	138	€/t
Zwischenfrucht Ertrag					5	t/ha
Erzeugerpreis					125	€/t
Kohlenstoff-Sequestrierung				1,26	1,26	t CO ₂ /ha
CO ₂ -Preis				30	30	€/t CO ₂
Marktleistung		198	198	236	308	€/ha
Saatgutkosten		63	63	63	120	€/ha
N-Input Mehrertrag		19	19	19	-32	kg/ha
N-Lieferung Zwischenfrucht		-60	-60	-60	0	kg/ha
N-Kosten	2,60	-106	-106	-106	-83	€/ha
P-Input Mehrertrag		7	7	7	-12	kg/ha
P-Kosten	1,50	11	11	11	-18	€/ha
K-Input Mehrertrag		23	23	23	-38	kg/ha
K-Kosten	1,20	28	28	28	-46	€/ha
Düngerkosten		-67	-67	-67	-147	€/ha
Direktkosten		-4	-4	-4	-27	€/ha
Lohnkosten		85	85	85	85	€/ha
Maschinenkosten		73	73	73	73	€/ha

Dieselskosten		48	48	48	48	€/ha
Kosten der Arbeitserledigung		206	206	206	206	€/ha
Direkt- & arbeitserledigungskostenfreie Leistung		-4	-4	34	129	€/ha

9.4.2 MITTELFRANKEN - MILCHVIEHBETRIEB MIT BIOGAS-ANLAGE

Aufgrund eines etwas niedrigeren Ertragsniveaus des Silomais gegenüber des Betriebs in Unterfranken fällt im Mittelfranken-Betrieb die Marktleistung durch die Ertragssteigerung der Folgefrucht mit 198 €/ha etwas niedriger aus. Durch den verringerten Mehrertrag müssen jedoch auch weniger Nährstoffe zusätzlich gedüngt werden, dadurch verringern sich auch die Düngerkos-

ten und somit die Gesamten Direktkosten auf - 4 €/ha bei Stufe 1 bis 3 und bei Stufe 4 auf -27 €/ha. Die Kosten der Arbeitserledigung sind mit 206 €/ha deutlich höher als beim Unterfranken Betrieb. Das liegt zum einem an den höheren Lohnkosten durch mehr Zeitaufwand bei der Bestellung aufgrund kleinerer Flächenstrukturen und anderer Wirtschaftsweise und zum anderen an den höheren Maschinenkosten aufgrund eines moderneren Fuhrparks.

Tab. 9-12: Kalkulation des Zwischenfruchtanbaus für die gesamte Fruchtfolge und gesamte Anbaufläche des Mittelfranken Betriebs.

DakfL ZWISCHENFRUCHT	PRO ha	PRO BETRIEB	DakfL GESAMT	DIFFERENZ DakfL	FLÄCHE ZWF
Stufe 1	- 3,65 €	- 175,20 €	52.576,80 €	- €	48
Stufe 2	- 3,65 €	- 292,00 €	52.460,00 €	- 116,80 €	80
Stufe 3	11,47 €	917,60 €	53.669,60 €	1.092,80 €	80
Stufe 4	106,87 €	8.549,60 €	61.301,60 €	8.724,80 %	80

Die DakfL von -3,65 €/ha bei Stufe 1 und 2 verringert sich gesamtbetrieblich betrachtet durch die Ausdehnung des Zwischenfruchtanbaus um -116,80 €. Die Teilnahme dieser zusätzlichen 32 ha Zwischenfrucht an Carbon Farming steigert die DakfL jedoch um 15,12 €/ha, was einer

Erhöhung von 1.209,60 € gegenüber Stufe 2 entspricht. Die Abfuhr der oberirdischen Biomasse, welche durch die Folgekultur Silomais auf der gesamten Zwischenfruchtanbaufläche durchgeführt werden kann, steigert die DakfL nochmals um 8.724,80 € gegenüber Stufe 1.

Tab. 9-13: Kalkulation der DakfL des Zwischenfruchtanbaus vor Silomais in Abhängigkeit der vier Stufen beim Oberpfalz Betrieb.

		STUFE 1	STUFE 2	STUFE 3	STUFE 4	
Mehrertrag		1,5	1,5	1,5	-2,5	t/ha
Ertragssteigerung Folgefrucht		9,0 €	9,0 €	9,0 €	-15,0 €	€
Erzeugerpreis		138	138	138	138	€/t
Zwischenfrucht Ertrag					5	t/ha
Erzeugerpreis					125	€/t
Kohlenstoff-Sequestrierung				1,26	1,26	t CO ₂ /ha
CO ₂ -Preis				30	30	€/t CO ₂
Marktleistung		206	206	244	295	€/ha
Saatgutkosten		63	63	63	120	€/ha
N-Input Mehrertrag		20	20	20	-34	kg/ha

N-Lieferung Zwischenfrucht		-60	-60	-60	0	kg/ha
N-Kosten	2,60	-104	-104	-104	-88	€/ha
P-Input Mehrertrag		7	7	7	-12	kg/ha
P-Kosten	1,50	11	11	11	-18	€/ha
K-Input Mehrertrag		24	24	24	-40	kg/ha
K-Kosten	1,20	29	29	29	-48	€/ha
Düngerkosten		-64	-64	-64	-154	€/ha
Direktkosten		-1	-1	-1	-34	€/ha
Lohnkosten		78	78	78	78	€/ha
Maschinenkosten		100	100	100	100	€/ha
Dieselskosten		54	54	54	54	€/ha
Kosten der Arbeitserledigung		232	232	232	232	€/ha
Direkt- & arbeitserledigungskostenfreie Leistung		-25	-25	12	97	€/ha

9.4.3 OBERPFALZ - MILCHVIEHBETRIEB

Das Ertragsniveau liegt beim Oberpfalz-Betrieb etwas höher als beim Mittelfranken-Betrieb, was die Marktleistung durch die Ertragssteigerung auf 206 €/ha erhöht. Doch auch hier erhöht der Mehrertrag die Düngerkosten etwas, so dass Direktkosten von -1 €/ha bei Stufe 1 bis 3 und -34 €/ha bei Stufe 4 entstehen. Die Kosten der

Arbeitserledigung steigern sich beim Oberpfalz-Betrieb nochmals. Gründe hierfür sind der Mehraufwand an Kraftstoff sowie eine geringere Auslastung des Fuhrparks aufgrund der Betriebsgröße. Dadurch verringern sich die DakfL aller Stufen gegenüber den anderen beiden Betrieben. Somit ist der Zwischenfruchtanbau mit einer -25 €/ha in Stufe 1 und 2 nicht mehr rentabel.

Tab. 9-14: Kalkulation des Zwischenfruchtanbaus für die gesamte Fruchtfolge und gesamte Anbaufläche des Oberpfalz Betriebs.

DakfL ZWISCHENFRUCHT	PRO HA	PRO BETRIEB	DakfL GESAMT	DIFFERENZ DakfL	FLÄCHE ZWF
Stufe 1	- 25,28 €	- 556,07 €	60.974,63 €	- €	22,0
Stufe 2	- 47,63 €	- 941,01 €	60.589,69 €	- 384,94 €	27,5
Stufe 3	- 28,73 €	- 733,11 €	60.797,59 €	- 177,04 €	27,5
Stufe 4	13,14 €	1.275,98 €	62.806,68 €	1.832,05 €	27,5

Der Anbau von 22 ha Zwischenfrucht verringert die DakfL um 556,07 € gegenüber einer Brache. Durch die maximale Ausdehnung des Zwischenfruchtanbaus auf 27,5 ha verringert sich die DakfL nochmals um 384,94 €. Grund hierfür ist die Etablierung einer Zwischenfrucht vor Erbsen, in der aufgrund von Fruchtfolgekrankheiten keine Leguminosen enthalten sind und diese somit nur 30 kg Stickstoff durch verhindertes Auswaschen an die Folgekultur liefert. Durch die fehlende Leistung der Stickstofflieferung können somit die Kosten der Bestellung dieser 5,5 ha nicht gedeckt werden. Mit der Teilnahme

dieser 5,5 ha Zwischenfrucht an Carbon Farming Initiativen steigert sich die DakfL auf -28,73 €/ha, was bei der Betrachtung des gesamten Betriebes 207,90 € gegenüber Stufe 2 entspricht. Die Beerntung der Zwischenfrucht kann nur auf den 22 ha Zwischenfrucht vor Silomais durchgeführt werden und steigert die DakfL gegenüber Stufe 1 um 1.832,05.

9.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit durch die DakfL zeigt alle für einen Produktionsvergleich

relevanten Leistungen und Kosten auf und ist somit ein sinnvolles ökonomisches Entscheidungskriterium für den Zwischenfruchtanbau. Den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Zwischenfruchtanbaus haben die Ertragssteigerung sowie die Einsparung von Düngermittel bei der Folgefrucht. Die Reduzierung von Düngemitteln spielt vor allem bei den derzeit hohen Düngermittelpreisen eine sehr große Rolle. Die Kosten durch den Entzug von zusätzlichen Nährstoffen durch den Mehrertrag sind stark abhängig vom Ertrag und den Entzugsfaktoren der Folgekulturen. Auch die Kosten für Saatgut können je nach Zusammensetzung der Zwischenfruchtmischung entsprechend stark variieren, entsprechen jedoch einem geringen Anteil der Gesamtkosten des Produktionsverfahrens. Die Kosten der Arbeitserledigung haben den größten negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und können sich zwischen den Betrieben aufgrund unterschiedlicher Flächenstrukturen und Arbeitsverfahren erheblich unterscheiden. Die Verwendung von typischen Betrieben zur wirtschaftlichen Bewertung zeigt diese Unterschiede für verschiedene Betriebstypen und Regionen. Der Anbau von Zwischenfrüchten nach den Vorgaben der GAP23 und DüV stellt sich meist als wirtschaftlich sinnvoll dar. Somit verbessert sich durch die Ausweitung des Zwischenfruchtanbaus auf die maximale Anbaufläche die DakfL des gesamten Betriebs. Auch die Teilnahme an privatwirtschaftlichen Carbon Farming Initiativen stellt

eine rentable Zusatzleistung dar. Doch muss hier beachtet werden, dass wegen des Grundsatzes der „Zusätzlichkeit“ nur mit Zwischenfruchtanbaufläche außerhalb gesetzlicher Vorgaben daran teilgenommen werden kann. Die Abfuhr des oberirdischen Biomasseaufwuchses bringt zunächst ebenfalls eine positive wirtschaftliche Leistung mit sich, doch sind damit auch Reduzierungen anderer Leistungen verbunden. Der negative Einfluss auf den Ertrag der Folgekultur reduziert die Leistungen erheblich. Auch das Entfallen der Nährstofflieferung wirkt sich negativ auf die DakfL aus. Aufgrund verschiedener variabler Einflussfaktoren ist die Beerntung von einer Zwischenfrucht nur für Betriebe sinnvoll, welche das Futter selbst verwerten können. Die Kosten der Düngung der Zwischenfrucht ist bei allen Szenarien unberücksichtigt, da diese aufgrund der Zwischenfruchtzusammensetzung und der Betriebsstrukturen stark variieren kann. Wird die Zwischenfrucht im Frühjahr geerntet, so ist meist eine organische Düngung der Kultur im Herbst notwendig, um dem Boden die Entzugswerte zurückzuführen. Diese Kalkulation soll nur ein beispielhaftes Schema mit den zu berücksichtigenden Einflussfaktoren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Zwischenfrüchten zeigen. Die flexiblen Faktoren der Kalkulation sind betriebsindividuell anzupassen und können unter Berücksichtigung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgruppen des CATCHY-Projekts optimiert werden.

INFOBOX

KURZ GELESEN:

- Bewertung der Wirtschaftlichkeit anhand der Direkt- und arbeitserledigungskostenfreien Leistung.
- Wichtigste Leistungen der Zwischenfrucht: Ertragssteigerung und Nährstofflieferung an die Folgekultur, Kohlenstoffsequestrierung, Erlös für oberirdische Biomasse.
- Wichtigste Kosten der Zwischenfrucht: Nährstoffbedarf für Mehrertrag, Saatgutkosten, Kosten der Arbeitserledigung.
- Einflussfaktoren der Kosten und Leistungen unterliegen einer gewissen Spannbreite, welche sowohl betriebs- als auch witterungsabhängig variieren.
- Wirtschaftliche Bewertung erfolgt anhand drei typischer Betriebe für Nordbayern.
- Die Wirtschaftlichkeit wird für vier Szenarien berechnet: IST-Zustand, Maximum an Zwischenfruchtanbau, Maximum plus Carbon Farming, Maximum plus Carbon Farming plus Nutzung des Aufwuchses.
- Die Leistungen der Zwischenfrucht entsprechen bei allen Betrieben und Szenarien in etwa den Kosten.
- Einige weitere sowohl positive als auch negative Faktoren konnten in der Berechnung nicht betrachtet werden, da diese schwierig zu quantifizieren sind.
- Wirtschaftlichkeit ist stark abhängig von den Kosten der Arbeitserledigung, welche betriebsindividuell angepasst werden müssen

Infobox 9-1.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Sophia Breische, Carmen Fiedler,

Jan Hendrik Schulz, Matthias Westerschulte

Der Ackerbau steht vor vielfältigen Herausforderungen: Neben dem Klimawandel gibt es neue politische und gesellschaftliche Anforderungen. Insbesondere der Zwischenfruchtanbau stellt eine Möglichkeit dar, die Umweltverträglichkeit im Sinne des integrierten Pflanzenbaus zu steigern, ohne dabei die Hauptaufgabe - die Produktion von Lebensmitteln - negativ zu beeinflussen. Um dieses Potenzial besser ausschöpfen zu können, wurde das Forschungsprojekt **CATCHY** initiiert. In langjährigen Fruchtfolgeversuchen wurde die Wirkung des Zwischenfruchtanbaus in Form von Einzelkomponenten und Mischungen im Vergleich zur Brache mit folgenden Schwerpunkten untersucht: Bodenstruktur und -qualität, Mikrobiom, Nährstoff- und Wasserhaushalt, Ertragswirkung und Rentabilität. Im Rahmen dieser Broschüre werden die wesentlichen Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Jede Pflanzenfamilie, -art und -sorte hat ein individuelles Wirkungsspektrum. Entsprechend kann die Kombination der unterschiedlichen Funktionen in Mischungen das gesamte Wirkungsspektrum erweitern und die Stabilität der Zwischenfrucht erhöhen. **Zwischenfruchtmischungen bieten gegenüber Einzelkomponenten** agronomische, ökologische und gesellschaftliche Vorteile.

Voraussetzung ist, dass entsprechend der betriebsindividuellen Zielsetzung eine der Fruchtfolge, dem Standort und dem Saatzeitpunkt angepasste Mischung eingesetzt wird. Außerdem sind die Effekte in intensiv geführten Pflanzenbausystemen schwächer als in extensiveren - dem natürlichen Ökosystem näheren - Produktionssystemen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Zwischenfrüchte eine relevante Maßnahme für den **Humusaufbau** darstellen. Die Ergebnisse bestätigen die Größenordnung aus vergleichbaren Publikationen. Wichtig ist hierbei das Verständnis der Langfristigkeit dieses Prozesses. Eine effektive Steigerung des Humusaufbaus ist nur bei kontinuierlicher Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge zu erzielen. Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Effizienz ist das C/N-Verhältnis der Sprossmasse. Ein enges C/N-Verhältnis von unter 25 begünstigt mikrobielle Prozesse und steigert dabei die Humusbildung. In den CATCHY-Versuchen zeigen Leguminosen und Mischungen mit Leguminosen das höchste Potenzial zum Humusaufbau.

Durch den Zwischenfruchtanbau werden auswaschungsbedingte **Nährstoffverluste minimiert**. Damit ist der Zwischenfruchtanbau ein wichtiges Instrument

für den Grundwasserschutz und dient der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie, insbesondere in den Roten Gebieten. Bezogen auf Stickstoff sind die folgenden Parameter zur Differenzierung unterschiedlicher Zwischenfrüchte entscheidend: Das Potenzial zur Bindung von Luftstickstoff sowie das C/N-Verhältnis, der Zeitpunkt des Absterbens bzw. Abtötens und der möglichen Einarbeitung. Mischungen können dabei Schwachstellen von Reinsaaten kompensieren.

Weiterhin verbessern Zwischenfrüchte die Bildung wasserstabiler Bodenaggregate. Mischungen weisen auch hier ein höheres Potenzial auf als Einzelkomponenten. Die damit **verbesserte Bodenstruktur** bietet vielfältige Vorteile, u. a. für die Verbesserung des Wasserhaushaltes und der Befahrbarkeit. Außerdem können negative Einflüsse von notwendigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen durch den Zwischenfruchtanbau wieder ausgeglichen werden.

Zwischenfrüchte können ein wirksames und umweltfreundliches Instrument sein, um **positive Einflüsse auf mikrobielle Funktionen im Boden** zu erzielen. Die Erhöhung der Pflanzenvielfalt im Zwischenfruchtanbau bewirkt eine größere Funktionalität von Mikroorganismen im Boden. Je größer diese ist, desto stabiler ist das Ökosystem gegenüber Störungen. Das liegt daran, dass nahezu alle Bodenfunktionen an mikrobielle Prozesse gebunden sind. Da jede Pflanzenart ein standort-individuelles Mikrobiom entwickelt, macht es einen Unterschied, ob und welche Einzelkomponente oder Mischung in der Fruchtfolge platziert wird. Dies beweist der im CATCHY-Projekt nachgewiesene Effekt auf das Mikrobiom in der Wurzel der folgenden Hauptkultur. Beispielsweise wurden in Maiswurzeln nach Phacelia und der 12er Mischung die meisten gesundheitsfördernden Pilze gefunden, während schädliche Fusariumpilze am häufigsten nach Brache oder Senf vorzufinden waren. Um zukünftig Zwischenfrüchte noch gezielter als entsprechendes Biokontrollmittel zu nutzen, ergibt sich weiterer umfangreicher Forschungsbedarf zu den spezifischen Wirkmechanismen zwischen Zwischenfrüchten und den Hauptkulturen in der Fruchtfolge. Als Grundsatz gilt: Je höher die Diversität an Mikroorganismen, aus der die Hauptkultur aus dem Boden rekrutieren kann, umso vorteilhafter ist dies für deren Bestandesvitalität. Neben diesen Wirkungen auf die Pflanzengesundheit hat die mikrobielle Biomasse auch eine wichtige Funktion als Speicher und Quelle für Kohlenstoff und Pflanzennährstoffe.

Zwischenfrüchte tragen wesentlich zur **Schließung der Nährstoffkreisläufe** im Ackerbau bei. Die Nährstoffaneignung eines Zwischenfruchtbestandes ist dabei abhängig vom Standort, dem Management und der Pflanzenart/-mischung. Einzelne Pflanzenarten differenzieren diesbezüglich sehr deutlich. Die wesentlichen Parameter sind die Geschwindigkeit der Biomassebildung, die Architektur des Wurzelsystems sowie spezifische Mobilisierungs- und Immobilisierungsmechanismen (z. B. Exsudate und das oben beschriebene Mikrobiom). In Mischungen lassen sich die artindividuellen Nährstoffaneignungsstrategien entsprechend vereinen. Dadurch haben Mischungen eine stabilere Biomassebildung und Nährstoffaneignung in verschiedenen Umwelten. Auch Mischungen differenzieren entsprechend stark in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung. Deshalb muss die Wahl der richtigen Mischung standortspezifisch in Abhängigkeit der Nährstoffbilanz & -freisetzung der vorherigen Hauptkultur und den Ansprüchen der Folgekultur getroffen werden. Die Nährstoffkonservierung über Winter ist stark abhängig von der Frosttoleranz. Bei früh absterbenden Arten kann bereits zeitnah die Nährstofffreisetzung einsetzen, während winterharte Komponenten die Nährstoffverluste am effizientesten mindern. Die Kombination von winterharten und abfrierenden Arten kann entsprechend sinnvoll sein, da früh abfrierende Arten durch die Pflanzenreste bereits das Bodenleben füttern, während weiterwachsende Arten freiwerdende Nährstoffe im System halten. Die Nährstoffübertragung in die Folgekultur ist neben der Winterhärte bzw. dem Abtötungsmanagement im Wesentlichen abhängig vom C/N-Verhältnis und der Einarbeitung. Die Dynamik folgt der Regel:

- Schnellste Freisetzung: Schnell abfrierend, enges C/N-Verhältnis und frühe Einarbeitung
- Späteste Freisetzung: Winterhart, weites C/N-Verhältnis und späte Einarbeitung

Insgesamt profitieren die Hauptkulturen hinsichtlich der Nährstoffversorgung in extensiven Produktionssystemen stärker und kurzfristiger als in intensiven Hochgedüngten. Dies gilt z. B. für den ökologischen und konventionellen Landbau im Vergleich. Wichtig ist, dass sich die positiven Effekte auf die Nährstoffversorgung nicht nur auf die Folgekultur, sondern auf die gesamte Fruchtfolge beziehen. Durch die langfristige Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge ergeben sich somit Möglichkeiten zur Düngemittelreduktion im gesamten Anbausystem.

Basierend auf den beschriebenen, vielfältigen Einflussparametern ergibt sich eine **komplexe Ertragswirkung** von Zwischenfrüchten auf die Hauptkulturen in der Fruchtfolge. Bei richtigem Management ist diese positiv. Dabei sind die kurzfristigen Ertragswirkungen auf die Folgekultur grundsätzlich eher gering einzuschätzen und lagen für Silomais bei +0,8 %. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass es Ertragswirkungen über die Folgekultur hinaus auf die gesamte Fruchtfolge gibt: Im Winterweizen nach Silomais ergaben sich in den Langzeitversuchen Ertragssteigerungen von +1 - 4 %. Dabei kombinieren Mischungen die Vorteile der einzelnen Arten und zeigen die potenziell höchsten Ertragssteigerungen. Ähnlich den positiven Wirkungen auf die Bodenstruktur und die Kohlenstoffbindung sind auch die Wirkungen auf den Ertrag als langfristig einzuschätzen.

Der Zwischenfruchtanbau ist ein effektives pflanzenbauliches Werkzeug um die **Klimaresilienz** des Ackerbaus zu stärken. Um die entsprechenden Funktionen zu erfüllen ist es aber wichtig, die Bestandesetablierung unter den zunehmend trockenen Bedingungen nach der Ernte der Vorfrucht sicherzustellen. Es gilt wassersparend zu arbeiten und den richtigen Saatzeitpunkt abzuspassen. Es konnte gezeigt werden, dass klug zusammengesetzte Mischungen nicht vorhersehbare Umwelteffekte ausgleichen und eine entsprechend schnelle und andauernde Bodenbedeckung ermöglichen.

Die Projektergebnisse belegen, dass mit Zwischenfrüchten der standortspezifische **Wasserhaushalt aktiv gesteuert** werden kann. Abfrierende Zwischenfrüchte können der folgenden Hauptkultur mehr Wasser zur Verfügung stellen als eine Brache und können somit insbesondere bei zunehmenden Frühsommertrockenheiten vorteilhaft sein. Winterharte Zwischenfrüchte hingegen - wenn sie nicht aktiv abgetötet werden - führen im Frühjahr zu einer negativen Wasserbilanz. Dies ist auf Trockenstandorten zu vermeiden, während es auf feuchten Standorten eine Möglichkeit bietet die Frühjahrsbestellung der Hauptkultur zu optimieren. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten lassen sich offenbar Stresssituationen in den nachfolgenden Hauptkulturen abmildern. In den Trockenjahren während des Projekts führte der Zwischenfruchtanbau zu durchschnittlichen Mehrerträgen von +11 % bei Silomais.

Die beschriebenen, vielfältigen Wirkungen des Zwischenfruchtanbaus sind bei der betriebswirtschaftlichen Betrachtung auch im Rahmen einer Kalkulation der Direkt- und arbeitserledigungsfreien Kosten

nicht vollumfassend quantifizierbar. Auf der Erlösseite sind im Wesentlichen die potenzielle Ertragssteigerung/-absicherung der Folgekultur und die Einsparung an Düngemitteln zu nennen. Weiterhin kann Carbon Farming ein zusätzlicher Erlösfaktor sein. Die Nutzung des Zwischenfruchtaufwuchses kann zur Reduzierung anderer Leistungen führen und ist nur bei betriebsinterner Nutzung sinnvoll. Auf Kostenseite sind der erhöhte Nährstoffentzug durch die Ertragssteigerung der Folgekultur und die Saatgutkosten sehr variabel und haben einen eher geringen Anteil an den Gesamtkosten. Die höchsten Kosten und damit das größte Optimierungspotenzial entfallen auf die Arbeitserledigung, welche je nach Betriebstyp, -größe, Anbaumanagement und Maschinenausstattung deutlich variieren können. Die Integration von Zwischenfrüchten kann auch vor den neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen als **wirtschaftlich sinnvoll** beurteilt werden. Insbesondere bei Berücksichtigung der vielen weiteren positiven Effekte, die nicht monetär quantifizierbar sind.

Das CATCHY-Projekt liefert basierend auf neun Jahren Forschung wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse für die vielfältigen Effekte des Zwischenfruchtanbaus in Pflanzenbausystemen. Dies ermöglicht die weitere Optimierung des Managements von Zwischenfruchtbeständen, um die Vorteilswirkungen zu maximieren und mögliche negative Effekte auszuschließen. Die Nutzung von Mischungen und die damit gesteigerte Diversität führt zu mehr Resilienz im Pflanzenbausystem. Dieser Mehrwert ist jedoch nur durch kontinuierliche Integration in das Anbausystem zu erzielen. Mit Blick auf die vielfältigen pflanzenbaulichen Herausforderungen in den kommenden Jahrzehnten kann die Nutzung von Zwischenfrüchten aber nur eine Maßnahme darstellen, um **resiliente Pflanzenbausysteme** zu entwickeln. Der Schlüssel liegt in der ganzheitlichen Förderung der Bodenfruchtbarkeit, als Basis für ertragreiche Kulturpflanzenbestände. Ein möglicher Ansatz könnte sein, den Boden möglichst durchgängig aktiv zu begrünen, Eingriffe in den Boden soweit wie möglich zu reduzieren und die Vielfalt im System zu erhöhen. Kurz: Immergrüne, biodiverse Fruchtfolgen zu kreieren.

Die geschaffenen Grundlagen können helfen, dafür notwendige, standortspezifische Pflanzengesellschaften zu entwickeln. Die Basis sind weite Fruchtfolgen mit entsprechend platzierten Zwischenfrüchten. Darüber hinaus sollten die Übergänge zwischen den Kulturen möglichst fließend und die Vielfalt innerhalb

der Hauptkulturen möglichst hoch sein. Dafür gilt es, weitere Instrumente wie Bei- und Untersaaten sowie Mischkultursysteme zu entwickeln, mit denen sich der Landwirt nach dem Baukastenprinzip betriebsindividuelle Lösungen zusammenstellen kann. Dadurch ergibt sich enormes weiteres Potenzial die Mikrobiom-Interaktionen, die Bodenstruktur und -qualität sowie den

Nährstoff- und Wasserhaushalt zu optimieren. Folglich kann es so langfristig gelingen, den Ertrag und die Rentabilität im Ackerbau standortadaptiert abzusichern.

Artenverzeichnis

DEUTSCHER NAME	WISSENSCHAFTLICHER NAME	NUTZUNG ALS ZWISCHEN- ODER HAUPTFRUCHT IM CATCHY-PROJEKT
Leguminosen		
Weißer Lupine	<i>Lupinus albus L.</i>	
Gelber Lupine	<i>Lupinus luteus L.</i>	
Felderbse	<i>Pisum sativum L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Ackerbohne	<i>Vicia faba L.</i>	Hauptfrucht (nur in humusmehrender Fruchtfolge)
Alexandrinerklee	<i>Trifolium alexandrinum L.</i>	Zwischenfrucht in Reinsaat und 4er Mischung
Perserklee	<i>Trifolium resupinatum L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Rotklee	<i>Trifolium pratense L.</i>	
Inkarnatklee	<i>Trifolium incarnatum L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Erdklee	<i>Trifolium subterraneum L.</i>	
Saatwicke	<i>Vicia sativa L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Winterwicke	<i>Vicia villosa Roth</i>	
Serradella	<i>Ornithopus sativus Brot.</i>	
Gräser		
Welsches Weidelgras	<i>Lolium multiflorum italicum</i>	
Deutsches Weidelgras	<i>Lolium perenne L.</i>	
Rotschwingel	<i>Festuca rubra agg. L.</i>	
Rauhafer	<i>Avena strigosa Schreb.</i>	Zwischenfrucht in Reinsaat und 4er Mischung
Sorghum	<i>Sorghum ×drummondii (Steud.) Millsp. & Chase</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Mais	<i>Zea mays L.</i>	Hauptfrucht
Winterroggen	<i>Secale cereale L.</i>	
Winterweizen	<i>Triticum aestivum L.</i>	Hauptfrucht
Wintergerste	<i>Hordeum vulgare L.</i>	
Gänsefußgewächse		
Zuckerrübe/Futterrübe	<i>Beta vulgaris subsp. vulgaris</i>	
Knöterichgewächse		
Buchweizen	<i>Fagopyrum tataricum (L.) Gaertn.</i>	
Korbblütler		
Sonnenblume	<i>Helianthus annuus L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Ramtilkraut	<i>Guizotia abyssinica (L.f.) Cass.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Kreuzblütler		
Abyssinischer Kohl	<i>Brassica carinata A.Braun</i>	
Gelbsenf	<i>Sinapis alba L.</i>	Zwischenfrucht in Reinsaat und 4er Mischung

Winterraps	<i>Brassica napus L.</i>	
Leindotter	<i>Camelina sativa (L.) Crantz</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Tiefenrettich	<i>Raphanus sativus L.</i>	Zwischenfrucht in 12er Mischung
Ölrettich	<i>Raphanus sativus var. oleiformis</i>	
Raublattgewächse		
Rainfarn-Phazalie	<i>Phacelia tanacetifolia Benth.</i>	Zwischenfrucht in Reinsaat, 4er - und 12er Mischung

Referenzen

1. Renius, W., Lütke-Entrup, E. & Lütke Entrup, N. Zwischenfruchtbau zur Futtergewinnung und Gründüngung: Ein Baustein zur Bodenfruchtbarkeit und zum Umweltschutz. 3. überarb. und erw. Aufl. Frankfurt (Main): DLG-Verl (1992).
2. Fründ, H.-C., Hinck, S., Palme, S., Riek, W. & Siewert, C. Bodenfruchtbarkeit: verstehen, erhalten und verbessern. (Erling Verlag, Clenze, 2019).
3. Abdalla, M. et al. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology* 25, 2530-2543 (2019).
4. Lütke Entrup, N. et al. Zwischen- und Zweitfrüchte im Pflanzenbau. (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn, 2018).
5. BMEL. Geschichte Der Gemeinsamen Agrarpolitik. Bundesministerium Für Ernährung Und Landwirtschaft. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-geschichte.html> (2014).
6. Clark, A. Managing Cover Crops Profitably. (SARE, College Park, MD, 2007).
7. Kutschera, L., Lichtenegger, E. & Sobotik, M. Wurzelatlas Der Kulturpflanzen Gemäßigter Gebiete Mit Arten Des Feldgemüsebaues. (DLG-Verlag, 2009).
8. Schubert, D., Heigl, L., Mießl, J., Offenberger, K. & Diepolder, M. Wirkung von Zwischenfrüchten. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* 31-33 (2022).
9. Kivelitz, H. Saatzeiten von Zwischenfrüchten optimieren. *Landwirtschaftskammer NRW* (2017).
10. Hallmann, J., Quadat-Hallmann, A. & Von Tiedemann, A. Phytomedizin: Grundwissen Bachelor. (utb GmbH, Stuttgart, Deutschland, 2009). doi:10.36198/9783838528632.
11. Lütke Entrup, N. Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau. (Mann, Gelsenkirchen, 2001).
12. Köppen, D. Bodenfruchtbarkeit im Agroökosystem. 2. (Kovač, Hamburg, 2004).
13. Bodenschutz in der Praxis. (utb GmbH, Stuttgart, Deutschland, 2017). doi:10.36198/9783838548203.
14. Cropp, J.-H. Praxishandbuch Bodenfruchtbarkeit: Humus verstehen | Direktsaat- und Mulchsysteme umsetzen | Klimakrise meistern. (Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), 2021).
15. Grundmann, S. Zwischenfrüchte früh säen. *Landwirtschaftskammer NRW, Münster Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben*, (2019).
16. Zimmermann, D. C. et al. Zwischenfrüchte mit dem Mäh-drescher säen. *DSV Innovation* (2011).
17. Schneider, M. Strohmanagement - Darauf sollten Sie achten! » Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. <https://llh.hessen.de/pflanze/marktfruchtbau/wintergetreide/strohmanagement-darauf-sollten-sie-achten/> (2021).
18. Lehrke, U. Frost lässt Zwischenfrüchte absterben. *dlv Digitalmagazin App* https://www.digitalmagazin.de/marken/landforst/hauptheft/2021-6/pflanzenbau/020_frost-laesst-zwischenfruechte-absterben (2021).
19. Chapagain, T., Lee, E. A. & Raizada, M. N. The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. *Sustainability* 12, 2058 (2020).
20. Couédel, A., Alletto, L., Tribouillois, H. & Justes, É. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 254, 50-59 (2018).
21. Florence, A. M. & McGuire, A. M. Do diverse cover crop mixtures perform better than monocultures? A systematic review. *Agronomy Journal* 112, 3513-3534 (2020).
22. Cardinale, B. J. et al. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature* 443, 989-992 (2006).
23. Thakur, A. K., Thakur, D. S., Patel, R. K., Pradhan, A. & Kumar, P. effect of different plant geometry and nitrogen levels, inrelation to growth characters, yield and economics on sweet corn (*zea mays sachharata* L.) at bastar plateau zone.
24. Altieri, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74, 19-31 (1999).
25. Griffin, T. S., Larkin, R. P. & Honeycutt, C. W. Delayed Tillage and Cover Crop Effects in Potato Systems. *Am. J. Pot Res* 86, 79-87 (2009).
26. Elhakeem, A. et al. Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands? *Field Crops Research* 270, 108217 (2021).
27. Isbell, F. et al. Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology* 105, 871-879 (2017).
28. Poeplau, C. & Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33-41 (2015).
29. Chaplot, V. & Smith, P. Cover crops do not increase soil organic carbon stocks as much as has been claimed: What is the way forward? *Global Change Biology* 29, 6163-6169 (2023).
30. Hudek, C., Putinica, C., Otten, W. & De Baets, S. Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. *European Journal of Soil Science* 73, e13147 (2022).
31. Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70, 555-569 (2006).
32. Bardgett, R. D. et al. Plant species and nitrogen effects on soil biological properties of temperate upland grasslands. *Functional Ecology* 13, 650-660 (1999).
33. Philippot, L. et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *ISME J* 7, 1609-1619 (2013).
34. Mendes, R. et al. Deciphering the Rhizosphere Microbiome for Disease-Suppressive Bacteria. *Science* 332, 1097-1100 (2011).
35. Santhanam, R. et al. Native root-associated bacteria rescue a plant from a sudden-wilt disease that emerged during continuous cropping. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112, (2015).

36. Ottow, J. C. G. *Mikrobiologie von Böden*. (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011). doi:10.1007/978-3-642-00824-5.
37. Koeslin-Findeklee, F. & Horst, W. J. Contribution of Nitrogen Uptake and Retranslocation during Reproductive Growth to the Nitrogen Efficiency of Winter Oilseed-Rape Cultivars (*Brassica napus* L.) Differing in Leaf Senescence. *Agronomy* 6, 1 (2016).
38. Ferguson, R. B. et al. Site-Specific Nitrogen Management of Irrigated Maize. *Soil Science Society of America Journal* 66, 544 (2002).
39. Liu, Z., Chen, Z., Ma, P., Meng, Y. & Zhou, J. Effects of tillage, mulching and N management on yield, water productivity, N uptake and residual soil nitrate in a long-term wheat–summer maize cropping system. *Field Crops Research* 213, 154–164 (2017).
40. Maidl, F. X., Suckert, J., Und, R. F. & Fischbeck, G. Standortserhebungen zur Stickstoffdynamik nach Anbau von Körnerleguminosen. *J Agronomy Crop Science* 167, 259–268 (1991).
41. Sieling, K. & Christen, O. Crop rotation effects on yield of oilseed rape, wheat and barley and residual effects on the subsequent wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science* 1–19 (2015) doi:10.1080/03650340.2015.1017569.
42. Thorup-Kristensen, K. Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations. *Plant Soil* 288, 233–248 (2006).
43. Lynch, J. P. Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. *New Phytologist* 223, 548–564 (2019).
44. Dakora, F. D. & Phillips, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245, 35–47 (2002).
45. Sun, B. et al. The relative contributions of pH, organic anions, and phosphatase to rhizosphere soil phosphorus mobilization and crop phosphorus uptake in maize/alfalfa polyculture. *Plant Soil* 447, 117–133 (2020).
46. Rajniak, J. et al. Biosynthesis of redox-active metabolites in response to iron deficiency in plants. *Nat Chem Biol* 14, 442–450 (2018).
47. Schaaf, G., Erenoglu, B. E. & Von Wirén, N. Physiological and biochemical characterization of metal-phytosiderophore transport in graminaceous species. *Soil Science and Plant Nutrition* 50, 989–995 (2004).
48. Subbarao, G. V. & Searchinger, T. D. A “more ammonium solution” to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2107576118 (2021).
49. Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W. & Kronzucker, H. J. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants* 3, 17074 (2017).
50. Roy, S. et al. Celebrating 20 Years of Genetic Discoveries in Legume Nodulation and Symbiotic Nitrogen Fixation. *Plant Cell* 32, 15–41 (2020).
51. Heuermann, D. et al. Catch crop mixtures have higher potential for nutrient carry-over than pure stands under changing environments. *European Journal of Agronomy* 136, 126504 (2022).
52. Komainda, M., Taube, F., Kluß, C. & Herrmann, A. Above- and belowground nitrogen uptake of winter catch crops sown after silage maize as affected by sowing date. *European Journal of Agronomy* 79, 31–42 (2016).
53. He, M. et al. Divergent variations in concentrations of chemical elements among shrub organs in a temperate desert. *Sci Rep* 6, 20124 (2016).
54. Eichler-Löbermann, B., Köhne, S., Kowalski, B. & Schnug, E. Effect of Catch Cropping on Phosphorus Bioavailability in Comparison to Organic and Inorganic Fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 31, 659–676 (2008).
55. Wendling, M. et al. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil* 409, 419–434 (2016).
56. Gentsch, N. et al. Soil nitrogen and water management by winter-killed catch crops. *SOIL* 8, 269–281 (2022).
57. Thomas, F. & Archambeaud, M. Zwischenfrüchte in Der Praxis: Eine Anleitung Zur Bewirtschaftung. (Bayer Handelsvertretung, 2018).
58. Böldt, M. et al. Evaluating Different Catch Crop Strategies for Closing the Nitrogen Cycle in Cropping Systems-Field Experiments and Modelling. *Sustainability* 13, 394 (2021).
59. Badawi, A. et al. Verluste Der Oberirdischen Biomasse von Abfrostandenden Begrünungspflanzen Durch Ausgasung Vor Der Einarbeitung in Den Boden. (Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-GumpensteinRaumberg-Gumpenstein, 2010).
60. Gentsch, N. Cover crops improve soil structure and change OC distribution in aggregate fractions. Zenodo <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10067563> (2022).
61. Gollner, G., Fohrafellner, J. & Friedel, J. K. Winter-hardy vs. freeze-killed cover crop mixtures before maize in an organic farming system with reduced soil cultivation. *Org. Agr.* 10, 5–11 (2020).
62. Rüegg, W. T., Richner, W., Stamp, P. & Feil, B. Accumulation of dry matter and nitrogen by minimum-tillage silage maize planted into winter cover crop residues. *European Journal of Agronomy* 8, 59–69 (1998).
63. Bressler, A. & Blesh, J. Episodic N₂O emissions following tillage of a legume-grass cover crop mixture. *Biogeosciences* 19, 3169–3184 (2022).
64. Duan, Y.-F. et al. Catch Crop Residues Stimulate N₂O Emissions During Spring, Without Affecting the Genetic Potential for Nitrite and N₂O Reduction. *Front. Microbiol.* 9, 2629 (2018).
65. Muhammad, I. et al. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 192, 103–112 (2019).
66. Sieling, K. Improved N transfer by growing catch crops - a challenge. *Journal of Cultivated Plants* 145–160 Seiten (2019) doi:10.5073/JFK.2019.06.01.
67. Wittwer, R. A., Dorn, B., Jossi, W. & Van Der Heijden, M. G. A. Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. *Sci Rep* 7, 41911 (2017).
68. Langelier, M., Chantigny, M. H., Pageau, D. & Vanasse, A. Nitrogen-15 labelling and tracing techniques reveal cover crops transfer more fertilizer N to the soil reserve than to the subsequent crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 313, 107359 (2021).

69. Wendeborn, S. The Chemistry, Biology, and Modulation of Ammonium Nitrification in Soil. *Angew Chem Int Ed* 59, 2182-2202 (2020).
70. Miller, A. J., Fan, X., Orsel, M., Smith, S. J. & Wells, D. M. Nitrate transport and signalling. *Journal of Experimental Botany* 58, 2297-2306 (2007).
71. Von Wirén, N. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. *Current Opinion in Plant Biology* 3, 254-261 (2000).
72. Subbarao, G. V. et al. Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 17302-17307 (2009).
73. Jensen, T. Nitrogen fertilizer, forms and methods of application. in *Irrigated Crop Production Update Conference* (2006).
74. Bending, G. D. & Lincoln, S. D. Inhibition of soil nitrifying bacteria communities and their activities by glucosinolate hydrolysis products. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1261-1269 (2000).
75. Juliette, L. Y., Hyman, M. R. & Arp, D. J. Mechanism-Based Inactivation of Ammonia Monooxygenase in *Nitrosomonas europaea* by Allylsulfide. *Appl Environ Microbiol* 59, 3728-3735 (1993).
76. Dietz, M., Machill, S., Hoffmann, H. C. & Schmidtke, K. Inhibitory effects of *Plantago lanceolata* L. on soil N mineralization. *Plant Soil* 368, 445-458 (2013).
77. Robinson, D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology & Evolution* 16, 153-162 (2001).
78. Viera-Vargas, M. S. et al. Use of different ^{15}N labelling techniques to quantify the contribution of biological N_2 fixation to legumes. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 1185-1192 (1995).
79. Blanco-Canqui, H. et al. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agronomy Journal* 107, 2449-2474 (2015).
80. Chahal, I., Vyn, R. J., Mayers, D. & Van Eerd, L. L. Cumulative impact of cover crops on soil carbon sequestration and profitability in a temperate humid climate. *Sci Rep* 10, 13381 (2020).
81. Kaye, J. P. & Quemada, M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 4 (2017).
82. Poeplau, C. & Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33-41 (2015).
83. Arora, N. K. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability* 2, 95-96 (2019).
84. Praveen, B. & Sharma, P. A review of literature on climate change and its impacts on agriculture productivity. *Journal of Public Affairs* 19, e1960 (2019).
85. Oldfield, E. E., Bradford, M. A. & Wood, S. A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *SOIL* 5, 15-32 (2019).
86. Adeux, G. et al. Long-term cover cropping in tillage-based systems filters weed community phenology: A seedbank analysis. *Field Crops Research* 291, 108769 (2023).
87. Fernando, M. & Shrestha, A. The Potential of Cover Crops for Weed Management: A Sole Tool or Component of an Integrated Weed Management System? *Plants* 12, 752 (2023).
88. Schumacher, M. & Gerhards, R. Facilitation of weed seed predation by living mulch and cover crops. *Weed Research* 62, 328-339 (2022).
89. Damien, M. et al. Flowering cover crops in winter increase pest control but not trophic link diversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247, 418-425 (2017).
90. Wang, Q., Li, Y., Handoo, Z. & Klassen, W. Influence of cover crops on populations of soil nematodes. *Nematropica* 79-92 (2007).
91. Javed, M. A. et al. The clubroot pathogen *Plasmodiophora brassicae*: A profile update. *Molecular Plant Pathology* 24, 89-106 (2023).
92. Blanco-Canqui, H. & Ruis, S. J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Soc of Amer J* 84, 1527-1576 (2020).
93. Koudahe, K., Allen, S. C. & Djaman, K. Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research* 10, 343-354 (2022).
94. Garba, I. I., Bell, L. W. & Williams, A. Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 34 (2022).
95. Elhakeem, A. et al. Radish-based cover crop mixtures mitigate leaching and increase availability of nitrogen to the cash crop. *Field Crops Research* 292, 108803 (2023).
96. Finney, D. M., White, C. M. & Kaye, J. P. Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. *Agronomy Journal* 108, 39-52 (2016).
97. Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Basisfakten zum Klimawandel - Zeitreihen und Trends. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=344870>.
98. Marschner, P. Chapter 15 - Rhizosphere Biology. in *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (ed. Marschner, P.) 369-388 (Academic Press, San Diego, 2012). doi:10.1016/B978-0-12-384905-2.00015-7.
99. Tribouillois, H., Constantin, J. & Justes, E. Analysis and modeling of cover crop emergence: Accuracy of a static model and the dynamic STICS soil-crop model. *European Journal of Agronomy* 93, 73-81 (2018).
100. Bodner, G., Loiskandl, W. & Kaul, H.-P. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agricultural Water Management* 93, 85-98 (2007).
101. Home - agri benchmark. <http://www.agribenchmark.org/home.html>.
102. Schön J, Gentsch N, Breunig P (2024) Cover crops support the climate change mitigation potential of agroecosystems. *PLoS ONE* 19(5): e0302139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302139>.
103. Kaul, Sanjana; Choudhary, Malvi; Gupta, Suruchi; Dhar, Manoj K. (2021): Engineering Host Microbiome for Crop Improvement and Sustainable Agriculture. In: *Frontiers*

- in Microbiology 12. Online verfügbar unter <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2021.635917>.
104. Hamdan, M.F.; Karlson, C.K.S.; Teoh, E.Y.; Lau, S.-E.; Tan, B.C. Genome Editing for Sustainable Crop Improvement and Mitigation of Biotic and Abiotic Stresses. *Plants* 2022, 11, 2625. <https://doi.org/10.3390/plants11192625>.
 105. Wang, Jun; Zhang, Shaohong; Sainju, Upendra M.; Ghimire, Rajan; Zhao, Fazhu (2021): A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water-use efficiency. In: *Agricultural Water Management* 256, S. 107085. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107085.
 106. Schmidt, J. (2023): Über die Zwischenfruchtaussaat per Drohne. Gespräch im Rahmen der Erstellung der CATCHY Dissemination am 16. Februar 2023. Anröchte: Schmidt Solutions.
 107. BLE (2018): Zwischen- und Zweitfrüchte im Pflanzenbau. 2. Auflage. Bonn: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Hrsg.). ISBN: 978-3-8308-1328-6.
 108. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (n.d.). BMEL - Pressemitteilungen - EU-Agrarreform: Bundeskabinett bringt GAP-Verordnungen auf den Weg. Retrieved July 19, 2024, from <https://www.bmel.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2022/145-gap-vo-kabinett.html>.
 109. Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E., & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications* 2015 6:1, 6(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>.
 110. Thakur, M. P., Milcu, A., Manning, P., Niklaus, P. A., Roscher, C., Power, S., Reich, P. B., Scheu, S., Tilman, D., Ai, F., Guo, H., Ji, R., Pierce, S., Ramirez, N. G., Richter, A. N., Steinauer, K., Strecker, T., Vogel, A., & Eisenhauer, N. (2015). Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. *Global Change Biology*, 21(11), 4076-4085. <https://doi.org/10.1111/GCB.13011>.
 111. Zak, D. R., Holmes, W. E., White, D. C., Peacock, A. D., & Tilman, D. (2003). PLANT DIVERSITY, SOIL MICROBIAL COMMUNITIES, AND ECOSYSTEM FUNCTION: ARE THERE ANY LINKS? *Ecology*, 84(8), 2042-2050. <https://doi.org/10.1890/02-0433>.
 112. AKEMO, M. C., REGNIER, E. E., & BENNETT, M. A. (2000). Weed Suppression in Spring-Sown Rye (*Secale cereale*)–Pea (*Pisum sativum*) Cover Crop Mixes. *Weed Technology*, 14(3), 545–549. [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2000\)014\[0545:WSISSR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2000)014[0545:WSISSR]2.0.CO;2)
 113. Altieri, M. A., & Liebman, M. (1986). Insect, weed, and plant disease management in multiple cropping systems. In C. A. Francis (Ed.), *Multiple cropping systems* (pp. 183-218). New York, NY: Macmillan.
 114. Brust, J., & Gerhards, R. (2012). Lopsided oat (*Avena strigosa*) as a new summer annual cover crop for weed suppression in Central Europe. *Julius-Kühn-Archiv*, 1(434), 257-264.
 115. Buhler, D. D. (2003). Weed biology, cropping systems, and weed management. In A. Shrestha (Ed.), *Cropping systems: trends and advances* (pp. 245-270). Binghamton, NY: Haworth Press.
 116. NRCS. (2017). Module 7 Cover crop management. Soil health & sustainability for field employees. Washington, DC: USDA- NRCS. Retrieved from http://www.cccdw.net/uploads/2/5/8/1/25810027/cover_crop_management.pdf
 117. Griffin, J. N., O’Gorman, E. J., Emmerson, M. C., Jenkins, S. R., Klein, A.-M., Loreau, M., & Symstad, A. 2009. Biodiversity and the stability of ecosystem functioning. In S. Naeem, D. E. Bunker, A. Hector, M. Loreau, & C. Perrings (Eds.), *Biodiversity, ecosystem functioning, and human wellbeing: An ecological and economic perspective* (pp. 78-93). New York: Oxford University Press.
 118. Bugg, R. L., Sarrantonio, M., Dutcher, J. D., & Phatak, S. C. (1991). Understory cover crops in pecan orchards: Possible management systems. *American Journal of Alternative Agriculture*, 6(2), 50-62.



Impressum

HERAUSGEBER:

BONARES-ZENTRUM

BonaRes steht für „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“. Bei BonaRes handelt es sich um eine Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 - Unser Weg zu einer biobasierten Wirtschaft.

AUTOR:INNEN:

Prof. Dr. Barbara Reinhold-Hurek, Dr. Thomas Hurek, Dr. Diana Heuermann, Prof. Dr. Nicolaus von Wirén, Dr. Norman Gentsch, Prof. Dr. Georg Guggenberger, Jonas Schön, Prof. Dr. Peter Breunig, Robin Kümmerer, Sophia Breische, Dr. Ulf Feuerstein, Carmen Fiedler, Jan Hendrik Schulz, Dörte Schweneker, Dr. Matthias Westerschulte, Michał Oskiera

KOORDINATION:

Prof. Dr. Hans-Jörg Vogel
Dr. Ute Wollschläger

SATZ UND LAYOUT:

Luise Ohmann (UFZ)
Miriam Hantzko (UFZ)

INFO@BONARES.DE

LIZENZ:

Die Inhalte dieser Broschüre stehen unter der Lizenz CC BY. Für weitere Informationen zur Verbreitung und Veränderung der Inhalte siehe: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.