

Meike Grosse¹, Jürgen Heß²

Sommerzwischenfrüchte für verbessertes Stickstoff- und Beikrautmanagement in ökologischen Anbausystemen mit reduzierter Bodenbearbeitung in den gemäßigten Breiten

Summer cover crops for improved nitrogen- and weed management in organic cropping systems with reduced tillage in temperate climates

173

Zusammenfassung

Zwischenfrüchte spielen in ökologischen Anbausystemen mit reduzierter Bodenbearbeitung eine wesentliche Rolle. In dieser Übersichtsarbeit werden Ergebnisse aus einer ausführlichen Literaturrecherche hinsichtlich des N-Lieferungs- und Beikrautunterdrückungspotenzials von Zwischenfrüchten dargestellt. Die N-Aufnahme- und Biomasseertragsdaten verschiedener Zwischenfruchtarten und -artenmischungen werden tabellarisch wiedergegeben. Sie unterliegen – auch innerhalb einer Art – einer großen Spannweite. Die N-Aufnahme ist dabei weitgehend – auch artübergreifend – vom Biomasseertrag abhängig. Gründe für ein gutes N-Aufnahmevermögen werden diskutiert. Die Steuerung der Mineralisierung durch die Wahl des Einarbeitungszeitpunkts wird erörtert. Mechanismen der Beikrautunterdrückung und Möglichkeiten zur Optimierung der Beikrautkontrolle durch Zwischenfrüchte werden beschrieben. Der Anbau von Zwischenfruchtmischungen wird dargestellt. Dieser kann eine höhere Ertragssicherheit bieten als der Anbau einer einzelnen Art.

Stichwörter: Zwischenfruchtanbau, Gründüngung, Zwischenfruchtarten, Zwischenfruchtmischungen, ökologischer Landbau, reduzierte Bodenbearbeitung, N-Aufnahme, Beikrautunterdrückung, Einarbeitungszeitpunkt

Abstract

Cover crops are important tools in organic cropping systems with reduced tillage. In this paper results of an extensive literature review regarding the N-supply potential and the ability of weed suppression by cover crops are presented. N-uptake and biomass yield data of different cover crop species and mixtures are given in tables. They are – even within one species – highly fluctuating. N uptake is – also across species – strongly dependent on biomass yield. Reasons for a good N-uptake ability are discussed. The control of the mineralisation through the choice of the incorporation date is considered. Mechanisms of weed control and possibilities to optimize weed control through cover crops are described. The cultivation of cover crop mixtures is presented. Compared to sole cropping, mixed cropping may offer higher yield stability.

Key words: Cover crop cultivation, green manures, cover crop species, cover crop mixtures, organic farming, reduced tillage, N-uptake, weed suppression, incorporation time

Einleitung

Der Zwischenfruchtanbau hat eine Schlüsselfunktion in der Fruchtfolge, um die Bodenstruktur, das Bodenleben

Institut

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Müncheberg¹
Universität Kassel, Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau, Witzenhausen²

Kontaktanschrift

Meike Grosse, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, E-Mail: meike.grosse@zalf.de

Zur Veröffentlichung angenommen

09. Januar 2018

und damit die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern (LÜTKE ENTRUP, 2001). Er kommt dem ganzheitlichen Ansatz des ökologischen Anbaus entgegen, da durch den Anbau von Zwischenfrüchten längerfristige Auswirkungen auf das gesamte Anbausystem auftreten (RAYNS und LENNARTSSON, 1995; KÖNIG, 1996; BÄRBERI, 2002; TEASDALE et al., 2007). Eine besonders wichtige Rolle spielt die Integration von Zwischenfrüchten in ökologischen Anbausystemen mit reduzierter Bodenbearbeitung. Der Anbau von Zwischenfrüchten kann hier sowohl der besseren Stickstoff (N)-Versorgung (DRINKWATER et al., 2000) als auch der Beikrautkontrolle dienen (BÄRBERI, 2002; PEIGNÉ et al., 2007; PRICE und NORSWORTHY, 2013). So kann ein fachkundiger Anbau von Zwischenfrüchten dazu beitragen, Ertragsverluste, die durch reduzierte Bodenbearbeitung entstehen können, zu minimieren oder ganz zu vermeiden. Gleichwohl gibt es auch Forscher, die eine wendende und mischende Bodenbearbeitung im Ökologischen Landbau für eine effiziente Nutzung bodenbürtiger Nährstoffe, insbesondere bei niedrigen Gehalten, als in der Regel unverzichtbar einschätzen (KÖPKE, 2003).

Winterzwischenfrüchte sind aufgrund des Nicht-Abfrierens im Ökologischen Landbau nur bedingt für pfluglose Systeme geeignet. Deren Terminierung ohne Herbizide ist zwar nicht unmöglich, aber dadurch, dass der passende Zeitpunkt z.B. für ein mechanisches Walzen oder Mulchen getroffen werden muss, eine Herausforderung (LEAVITT et al., 2011; REBERG-HORTON et al., 2012). Daher werden in dieser Übersichtsarbeit abfrierende Sommerzwischenfrüchte näher betrachtet. Dabei soll der Stand der Literatur zu folgenden Fragen aufgezeigt werden:

- Welche Zwischenfruchtarten oder Zwischenfruchtmischungen eignen sich in Ackerbaufruchtfolgen am besten, um Stickstoff in den Boden zu bringen?
- Wie kann man die Mineralisierung der pflanzlichen Zwischenfrucht-Biomasse durch die Wahl des Zeitpunkts und der Intensität der Einarbeitung steuern?
- Mit welchen Zwischenfruchtarten oder -mischungen lassen sich Beikräuter am effektivsten unterdrücken?
- Was sind die Vor- und Nachteile von Zwischenfruchtmischungen im Vergleich zu Zwischenfrüchten in Reinsaat?

Zwischenfruchtanbau zur N-Versorgung nachfolgender Kulturen

Potenziale verschiedener Zwischenfrucht-Arten zur N-Konservierung und -Fixierung

Verschiedene Zwischenfruchtarten haben bedingt durch unterschiedliche Eigenschaften ein unterschiedliches Potenzial zur N-Aufnahme aus Boden bzw. Luft und Boden. Dieses steht in Wechselwirkung mit den Anbaubedingungen. Nicht-Leguminosen haben eine N konservierende Wirkung, d. h. sie speichern den aufgenommenen N und können ihn so über die Wintermonate im Boden halten (engl. „Catch Crops“) und vor Auswaschung schützen (HEß, 1989; THORUP-KRISTENSEN und

NIELSEN, 1998; BAGGS et al., 2000; BLOMBÄCK et al., 2003; DABNEY et al., 2007; URBATZKA et al., 2009). Legume Zwischenfrüchte bringen durch ihre Fähigkeit, symbiotisch Luftstickstoff zu assimilieren, zusätzlichen N in den Boden.

Das Wurzelwerk hat einen Einfluss auf das N-Aufnahmevermögen. Dies gilt vor allem für den Unterboden. Nicht-legume dikotyle Arten hatten in Versuchen von THORUP-KRISTENSEN (2001) ein schnelleres und in 1 m Bodentiefe wesentlich intensiveres Wurzelsystem als die untersuchten monokotylen Arten. In einer Bodentiefe von 100–150 cm zeigte Ölrettich (*Raphanus sativus*) die mit Abstand effektivste Nitrataufnahme (THORUP-KRISTENSEN, 2001).

Ein weiterer Einflussfaktor auf das Aufnahmevermögen der Zwischenfrucht von Boden-N kann das Wachstumsstadium sein, das die Zwischenfrucht vor Einbruch des Winters erreicht. In einer Studie von THORUP-KRISTENSEN (1994) mit verschiedenen Zwischenfrüchten, die alle am 01.08. gesät worden waren, fingen insbesondere Phacelia und Gelbsenf, aber auch Hafer und Lupine Anfang Oktober zu blühen an. Ölrettich fing erst wesentlich später an zu blühen und war in der N-Aufnahme den anderen Arten überlegen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass ein später Blühbeginn die Dauer der N-Aufnahme verlängern kann (THORUP-KRISTENSEN, 1994).

Die N₂-Fixierleistung von Leguminosen wird angeregt, wenn wenig pflanzenverfügbares N im Boden vorhanden ist. Daher kann z. B. die Art der Bodenbearbeitung zum Leguminosenanbau einen Einfluss auf die Fixierleistung haben. Reduzierte Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat kann eine verringerte Mineralisation zur Folge haben und daher die N₂-Fixierung der nach derartiger Saattbettbereitung gesäten Leguminosen erhöhen (SCHMIDTKE, 2008).

Um die Kapazität verschiedener Zwischenfruchtarten und -mischungen zu vergleichen, werden in der folgenden Tab. 1 Daten zu deren N-Aufnahme und Biomassertrag aus der Literatur wiedergegeben. Die Tabelle ist in die folgenden Gruppen unterteilt:

- Reinsaat – Leguminosen
- Reinsaat – Nicht-Leguminosen
- Mischungen aus Leguminosen
- Mischungen aus Nicht-Leguminosen
- Mischungen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen.

In jeder Gruppe sind die Zwischenfruchtarten bzw. Mischungen nach deren N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse absteigend sortiert.

Die N-Aufnahme und Biomasserträge der Zwischenfrüchte unterliegen einer großen Spannweite (Tab. 1). Die höchste N-Aufnahme wurde bei einer Leguminose gemessen (Ackerbohne mit 204 kg N ha⁻¹ bei 75 dt ha⁻¹ TM Ertrag). Auch bei Nicht-Leguminosen gab es hohe N-Aufnahmen (Maximum Ölrettich mit 167 kg N ha⁻¹ bei 57 dt ha⁻¹ TM Ertrag), was aber ein hohes N-Ausgangsniveau des Bodens voraussetzt (Einsatz als „Catch-Crop“).

Tab. 1. Biomasseertrag und N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse verschiedener Zwischenfruchtarten und Zwischenfruchtmischungen

Zwischenfrucht	N-Aufnahme oberird. Biomasse [kg ha ⁻¹]	Biomasseertrag (oberirdisch) [dt TM ha ⁻¹]	Ort	Quelle
Leguminosen (in Reinsaat)				
Ackerbohne (<i>Vicia faba</i>)	204	75	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Alexandrinerklee (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	188	66	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	176	44	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Ackerbohne (<i>Vicia faba</i>)	172	78	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Ackerbohne (<i>Vicia faba</i>)	169	63	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Erbse (<i>Pisum sativum</i>)	166	55	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	164	46	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Saat-Platterbse (<i>Lathyrus sativus</i>)	161	40	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sojabohne (<i>Glycine max</i>)	143	48	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	143	35	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	140	35	Aarslev, Dänemark	MUELLER und THORUP-KRISTENSEN, 2001
Erbse (<i>Pisum sativum</i>)	139	45	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Saat-Platterbse (<i>Lathyrus sativus</i>)	129	30	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	124	30	Frankenhausen, Deutschland	GROSSE und HEß, 2015
Erbse (<i>Pisum sativum</i>)	120	33	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	115	26	Aarslev, Dänemark	MUELLER und THORUP-KRISTENSEN, 2001
Alexandrinerklee (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	114	29	Aarslev, Dänemark	MUELLER und THORUP-KRISTENSEN, 2001
Linse (<i>Lens culinaris</i>)	108	32	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Linse (<i>Lens nigricans</i>)	98	28	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Blaue Lupine (<i>Lupinus angustifolius</i>)*	97	29	Aarslev, Dänemark	THORUP-KRISTENSEN, 1994
Ungarische Wicke (<i>Vicia pannonica</i>)	96	20	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Bockshornklee (<i>Trigonella foenum-graecum</i>)	90	38	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)*	90	26	Viehhausen, Deutschland	MÖLLER und REENTS, 2009
Erbse (<i>Pisum sativum</i>)*	89	25	Viehhausen, Deutschland	MÖLLER und REENTS, 2009
Weißer Lupine (<i>Lupinus albus</i>)	88	56	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	85	26	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Alexandrinerklee (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	85	20	Aarslev, Dänemark	MUELLER und THORUP-KRISTENSEN, 2001
Alexandrinerklee (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	81	32	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Ungarische Wicke (<i>Vicia pannonica</i>)	80	19	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	80	16	Aarslev, Dänemark	MUELLER und THORUP-KRISTENSEN, 2001
Alexandrinerklee (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	76	32	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	74	21	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	73	15	Frankenhausen, Deutschland	GROSSE und HEß, 2015
Blaue Lupine (<i>Lupinus angustifolius</i>)	70	25	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Linse (<i>Lens culinaris</i>)	67	22	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	65	17	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Platterbse (<i>Lathyrus</i>)	64	12	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	62	22	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sojabohne (<i>Glycine max</i>)	60	34	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015

Tab. 1. Fortsetzung

Zwischenfrucht	N- Aufnahme oberird. Biomasse [kg ha ⁻¹]	Biomasse- ertrag (ober- irdisch) [dt TM ha ⁻¹]	Ort	Quelle
Weißer Lupine (<i>Lupinus albus</i>)	59	47	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Bodenfrüchtiger Klee (<i>Trifolium subterraneum</i>)	59	17	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Blaue Lupine (<i>Lupinus angustifolius</i>)	54	19	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	51	18	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Sommerwicke (<i>Vicia sativa</i>)	50	18	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Bodenfrüchtiger Klee (<i>Trifolium subterraneum</i>)	43	15	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Bockshornklee (<i>Trigonella foenum-graecum</i>)	33	18	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)	23	6	Frankenhausen, Deutschland	GROSSE und HEß, 2015
Kichererbse (<i>Cicer arietinum</i>)	22	11	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Perserklee (<i>Trifolium resupinatum</i>)*	15	5	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Kichererbse (<i>Cicer arietinum</i>)	9	4	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Nicht-Leguminosen (in Reinsaat)				
Ölrettich (<i>Raphanus sativus</i>)*	167	57	Aarslev, Dänemark	THORUP-KRISTENSEN, 1994
Sonnenblume (<i>Helianthus annuus</i>)	157	103	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)*	147	47	Aarslev, Dänemark	THORUP-KRISTENSEN, 1994
Gelbsenf (<i>Sinapis alba</i>)*	144	55	Aarslev, Dänemark	THORUP-KRISTENSEN, 1994
Winterrettich (<i>Raphanus sativus longipinnatus</i>)	139	63	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	132	63	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Ramtillkraut (<i>Guizotia abyssinica</i>)	129	76	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Rauhafer (<i>Avena strigosa</i>)	123	65	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Chia (<i>Salvia hispanica</i>)	116	60	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Lein (<i>Linum usitatissimum</i>)	114	54	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Brauner Senf (<i>Brassica juncea</i>)	112	66	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Echter Hanf (<i>Cannabis sativa</i>)	108	48	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Ölrettich (<i>Raphanus sativus oleiformis</i>)	102	64	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Sudangras (<i>Sorghum sudanense</i>)	100	58	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Gelbsenf (<i>Sinapis alba</i>)	90	67	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Kolbenhirse (<i>Setaria italica</i>)	90	45	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Rübsen (<i>Brassica rapa campestris</i>)	90	44	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Hafer (<i>Avena sativa</i>)*	85	32	Aarslev, Dänemark	THORUP-KRISTENSEN, 1994
Gelbsenf (<i>Sinapis alba</i>)*	84	31	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Ölrettich (<i>Raphanus sativus</i>)*	83	33	Viehhausen, Deutschland	MÖLLER und REENTS, 2009
Sommerraps (<i>Brassica napus</i>)	76	24	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	74	55	Zollikofen, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerraps (<i>Brassica napus</i>)*	74	19	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)*	64	18	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Sommerraps (<i>Brassica napus</i>)	61	23	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Buchweizen (<i>Fagopyrum esculentum</i>)*	59	26	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004

Tab. 1. Fortsetzung

Zwischenfrucht	N- Aufnahme oberird. Biomasse [kg ha ⁻¹]	Biomasse- ertrag (ober- irdisch) [dt TM ha ⁻¹]	Ort	Quelle
Sommerraps (<i>Brassica napus</i>)	57	21	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	55	52	Changins, Schweiz	BÜCHI et al., 2015
Sommerraps (<i>Brassica napus</i>)	52	20	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Buchweizen (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	46	28	Changins, Schweiz	WENDLING et al., 2016
Gelbsenf (<i>Sinapis alba</i>)	43	17	Frankenhausen, Deutschland	GROSSE und HEß, 2015
Gelbsenf (<i>Sinapis alba</i>)	35	21	Frankenhausen, Deutschland	GROSSE und HEß, 2015
Mischungen aus Leguminosen				
Ackerbohne/Erbse/Lupine/Sommerwicke	111	32	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Ackerbohne/Erbse/Lupine/Sommerwicke	92	25	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Blaue/Weiße Lupine*	89	24	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Erbse/Platterbse/Sommerwicke	80	25	Großenzersdorf, Österreich	RINNOFNER et al., 2005a
Mischungen aus Nicht-Leguminosen				
Ölrettich/Phacelia/Stoppelrübe	60	30	Großenzersdorf, Österreich	RINNOFNER et al., 2005a
Phacelia/Senf*	32	14	Gülzow, Deutschland	GRUBER und THAMM, 2005
Phacelia/Senf	22	8	Neu-Eichenberg, Deutschland	SCHMIDT, 1997
Mischungen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen				
Erbse/Hafer	113	35	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Erbse/Ölrettich/Phacelia/Platterbse/ Sommerwicke/Stoppelrübe	110	40	Großenzersdorf, Österreich	RINNOFNER et al., 2005a
Ölrettich/Sommerwicke*	108	33	Viehhausen, Deutschland	MÖLLER und REENTS, 2009
Erbse/Hafer	93	30	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Erbse/Ölrettich*	78	29	Viehhausen, Deutschland	MÖLLER und REENTS, 2009
Buchweizen/Perserklee/Phacelia/Platterbse*	71	25	Roda, Deutschland	KOLBE et al., 2004
Erbse/Hafer	55	20	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Erbse/Hafer	51	18	Griesheim, Deutschland	KÖNIG, 1996
Senf/Sommerwicke	40	15	Gülzow, Deutschland	GRUBER und THAMM, 2005
Erbse/Sommerwicke/Sonnenblume*	33	11	Gülzow, Deutschland	GRUBER und THAMM, 2005
Perserklee/Phacelia*	17	7	Gülzow, Deutschland	GRUBER und THAMM, 2005

* Mittelwert aus zwei oder mehr Jahren

Die N-Aufnahme hängt weitgehend vom Biomassertrag ab. Eine Überprüfung der Abhängigkeit der N-Aufnahme vom Biomassertrag wurde jeweils für Leguminosen, Nicht-Leguminosen und Mischungen durch eine lineare Regression durchgeführt. Sie ergab ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,7 für Leguminosen, von 0,6 für Nicht-Leguminosen und von 0,87 für Mischungen (Abb. 1 bis 3). Damit konnte das Ergebnis von BARESEL et al. (2003), der in Versuchen mit verschiedenen Leguminosenarten herausfand, dass deren N-Mengen im Aufwuchs bei N-Gehalten zwischen 2 und 2,4% in erster Linie von der Biomasse abhängen, sogar für einen weiteren Bezugsrahmen bestätigt werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Zwischenfrüchte wesentlich mehr N als die in Tab. 1 zitierten N-Mengen aufnehmen und zum N-Kreislauf beitragen, da die Wurzelmasse einen bedeutenden Speicher für N darstellt. Diese N-Mengen konnten hier mangels Daten in der Literatur nicht wiedergegeben werden. Darüber hinaus ist auch N, der von den Zwischenfrüchten als Rhizodeposition an die Wurzelumgebung abgegeben wird, eine nicht zu vernachlässigende Größe (KANDERS et al., 2017).

Bezüglich der Zwischenfruchtarten geht aus Tab. 1 hervor, dass dieselbe Art sowohl einen sehr hohen N- und Biomassertrag aufweisen kann als auch einen sehr niedrigen, wie zum Beispiel Perserklee ($140 \text{ kg N ha}^{-1} - 15 \text{ kg N ha}^{-1}$). Insbesondere bei Perserklee wurde in verschiedenen Quellen von Totalausfällen bzw. minimalen Aufwüchsen berichtet (KÖNIG, 1996; KOLBE et al., 2004; GRUBER und THAMM, 2005; GROSSE et al., 2014b). Als Gründe für die Schwankungen in den Erträgen werden bei BARESEL et al. (2003) die Anbaubedingungen, speziell die Wasserversorgung, und die Anbautechnik und in der Folge der Feldaufgang genannt. KOLBE et al. (2004) haben aber in mehrjährigen Versuchen festgestellt, dass der oberirdische Ertrag der Zwischenfrucht nicht immer entscheidend für den Ertrag der nachfolgenden Hauptfrucht ist. So können feinsamige Leguminosen wie der Perserklee, die abhängiger von der Witterung sind als grobkörnige Leguminosen, auch in Jahren mit sehr geringer Massebildung Ertragszuwächse bei der nachfolgenden Hauptfrucht ermöglichen (KOLBE et al., 2004).

Die N-Aufnahme- und Ertragsdaten in Tab. 1 sagen wenig darüber aus, wieviel N der Folgekultur zur Verfügung steht, da es darauf ankommt, dass die Mineralisierung zum richtigen Zeitpunkt N freisetzt. So kann bei abfrierenden Leguminosen aufgrund des eher engen C/N-Verhältnisses die Mineralisierung schon früh einsetzen, was zu N-Verlusten durch Auswaschung führen kann (THORUP-KRISTENSEN, 1994) und andererseits kann die Mineralisierung bei einem weitem C/N-Verhältnis zu spät einsetzen und Boden-N immobilisieren (BAGGS et al., 2000). Neben dem C/N-Verhältnis spielt auch der Ligningehalt für den Verlauf der Mineralisierung eine entscheidende Rolle (THORUP-KRISTENSEN, 1994).

Effekte des Einarbeitungszeitpunkts auf die N-Mineralisierung

Der Verlauf der Mineralisierung lässt sich durch die Wahl des Einarbeitungszeitpunktes beeinflussen. Grundsätzlich ist die natürliche N-Dynamik des Bodens im Jahresverlauf von mehreren Mineralisierungsphasen gekennzeichnet (SCHELLER, 1993). Diese Dynamik wird durch

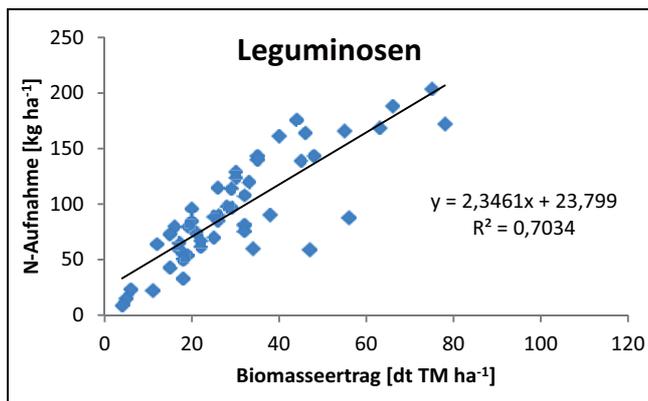


Abb. 1. N-Aufnahme der legumen Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von ihrem Biomassertrag (n = 50).

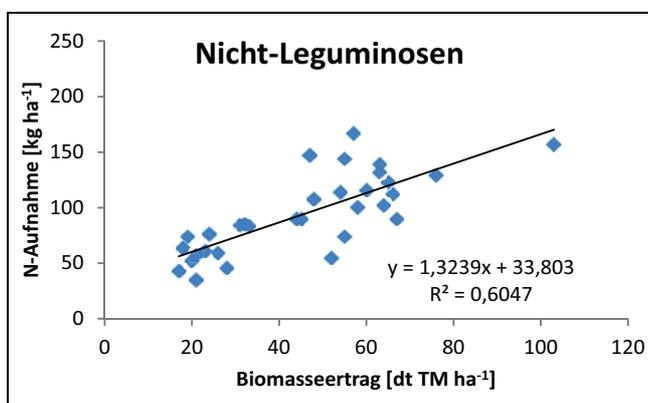


Abb. 2. N-Aufnahme der nicht-legumen Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von ihrem Biomassertrag (n = 32).

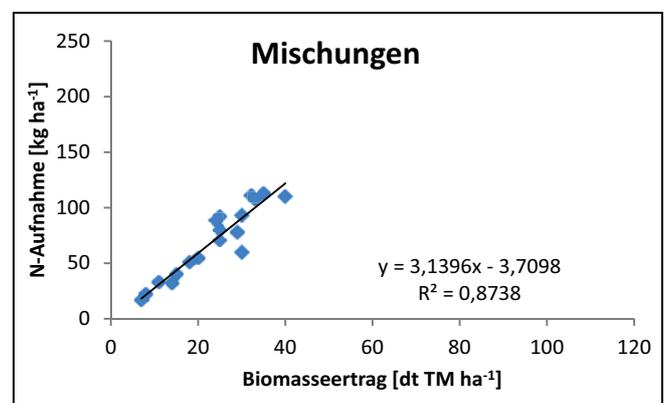


Abb. 3. N-Aufnahme der Zwischenfruchtmischungen in Abhängigkeit von ihrem Biomassertrag (n = 18).

Temperatur und Bodenfeuchte ausgelöst und durch Bodenbearbeitung beeinflusst bzw. verstärkt. Die Steuerung der Stickstoffdynamik zielt auf die Erhöhung der N-Verfügbarkeit im Frühjahr und die Nitrifixierung im Herbst (REENTS und MÖLLER, 2001). Für die Erreichung dieser Ziele ist neben der Wahl der Zwischenfrucht oder Zwischenfruchtmischung der Zeitpunkt der Einarbeitung von entscheidender Bedeutung (THORUP-KRISTENSEN und DRESBØLL, 2010).

In einigen Quellen wird lediglich zwischen einem Einarbeitungszeitpunkt im Herbst oder im Frühjahr differenziert. Um N-Verluste durch Nitratverlagerung zu vermeiden wird empfohlen, wenn die Bodenart dies erlaubt, die Zwischenfrüchte erst im Frühjahr umzubringen (NIEDER, 1998). Allerdings ist laut KÖNIG (1996) auf schweren Böden im Hinblick auf die Nitratverlagerung auch ein Herbstumbruch vertretbar. Aus einer Studie von MÖLLER und REENTS (2009) geht hervor, dass ein Herbstumbruch (Anfang Oktober) zwar zu einer höheren Nitratverlagerung führte, allerdings überwiegend nur bis zu einer Tiefe von 1,5 m, so dass ein Großteil des Nitrats vom nachfolgenden Winterweizen wieder aufgenommen werden konnte. Als Ursache kommen sowohl der kapillare Wiederaufstieg von nitrathaltigem Sickerwasser in der Vegetationsperiode als auch das Erwaschen tieferer Bodenschichten ab Mai in Betracht. Da die Nitratauswaschung im Herbst nach Leguminosen in Reinsaat (Erbsen, Sommerwicke, Winterwicke) am höchsten war, schließen die Autoren, dass die untersuchten Nicht-Leguminosen und Leguminosen-Nicht-Leguminosen-Mischungen (Ölrettich, Ölrettich + Erbsen, Ölrettich + Sommerwicke) ihren Zweck auch bei einem Herbstumbruch erfüllen können; Leguminosen in Reinsaat sollten aber sinnvollerweise erst im Frühjahr umgebrochen werden (MÖLLER und REENTS, 2009).

In anderen Quellen wird zwischen einem um wenige Wochen verschobenen Termin im Herbst oder Frühjahr unterschieden. THORUP-KRISTENSEN und DRESBØLL (2010) beobachteten bei einer Verschiebung des Einarbeitungszeitpunkts von Grünroggen nach hinten einen Einfluss auf verschiedene Faktoren, die in Verbindung mit der N-Verfügbarkeit für die nachfolgende Hauptfrucht stehen. Eine spätere Einarbeitung im Herbst lässt den Zwischenfrüchten mehr Zeit, N aufzunehmen. Da außerdem die N-Mineralisierung später beginnt, ist das Auswaschungsrisiko vermindert (THORUP-KRISTENSEN et al., 2003). Beides kann zu einer höheren N-Verfügbarkeit für die folgende Hauptfrucht führen; ein späterer Einarbeitungszeitpunkt im Herbst kann also – wo möglich – empfohlen werden. Eine Studie von RAYNS und LENNARTSSON (1995) kommt zu dem Ergebnis, dass ein frühes Einarbeiten im Frühjahr von Zwischenfrüchten mit weitem C/N-Verhältnis anzustreben ist. So war es auf deren Versuchsstandort (Bodenart: sandiger Lehm) von Vorteil, nach der Einarbeitung von Grünroggen etwa einen Monat mit der Aussaat einer Nachfrucht zu warten. Es setzte sofort nach der Einarbeitung, die Mitte April stattgefunden hatte, eine leichte Mineralisierung des umgebrochenen Grünroggens ein, die jedoch erst gut einen Monat später ihren vorläufigen Höhepunkt mit rund 60 kg N/ha in 0–15 cm

Bodentiefe erreichte (RAYNS und LENNARTSSON, 1995). Ähnliches gilt für den Umbruch von Ölrettich bei Umbruchterminen am Anfang Februar versus Ende März und Anfang Mai (RENIUS et al., 1992). Bei Zwischenfrüchten mit engerem C/N-Verhältnis setzt die Mineralisierung dagegen schneller ein und kann schon zwei Wochen nach der Einarbeitung einen ersten Höhepunkt erreichen (RAYNS und LENNARTSSON, 1995).

Allerdings sollten auf einem stark auswaschungsgefährdeten Standort vorzugsweise überwinterte Zwischenfrüchte oder zumindest eine Mischung aus abfrierenden und überwinterten Zwischenfrüchten angebaut werden, da eine abfrierende Sommerung auch ohne Umbruch sukzessiv N abgibt (KÖNIG, 1996). Dies ist vor allem dann der Fall, wenn es einen frühen Frosteinbruch mit anschließender milder Witterung gibt (HEß, 1989).

Zwischenfruchtanbau zur Beikrautkontrolle

Mechanismen der Beikrautunterdrückung

Befürchtungen Beikräuter nicht ausreichend kontrollieren zu können sind häufig das größte Hemmnis für ökologisch wirtschaftende Landwirte, eine konservierende Bodenbearbeitung umzusetzen (CARR et al., 2012). Zwischenfrüchte können einem zunehmenden Beikrautauftreten entgegenwirken. Aufgrund ihrer Konkurrenzfähigkeit können sie Beikraut unterdrückende Wirkung zeigen (BÄRBERI, 2002; SHRESTHA et al., 2002; PEIGNÉ et al., 2007; TEASDALE et al., 2007). Zwischenfrüchte können sowohl während ihrer Wachstumsperiode als auch in abgestorbenem Zustand eine Beikraut unterdrückende Wirkung haben. Durch die Absorption von Licht sowie die Konkurrenz um Wasser, Nährstoffe und Raum hat in der Regel die noch lebende Zwischenfrucht eine bessere Beikraut unterdrückende Wirkung als die abgestorbene Pflanzenmasse (TEASDALE et al., 2007). Eine schnelle Bodenbedeckung und eine hohe Biomasseproduktion der Zwischenfrucht sind daher wichtige Eigenschaften zur Beikrautunterdrückung (STADLER et al., 2009; BRUST et al., 2011; DORN et al., 2011; DORN et al., 2013;). Nicht nur die oberirdische Biomasse sondern auch die Wurzelmasse der Zwischenfrüchte ist im Hinblick auf eine effiziente Nährstoff- und Wasserkonkurrenz gegenüber den Beikräutern von Bedeutung (BRUST et al., 2011).

Eine Mulchschicht aus abgestorbenem Pflanzenmaterial kann als physikalische Barriere gegen keimende Beikräuter wirken (BOND und GRUNDY, 2001). Außerdem kann sie Umweltreize, die die Keimruhe beenden, abschwächen (MIRSKY et al., 2013).

Zwischenfrüchte können nicht nur das Wachstum von Beikräutern verhindern oder erschweren, sondern auch die Samenproduktion. Oft korreliert die Biomasse von Beikräutern positiv mit ihrer Samenproduktion (LUTMAN, 2002). Daher können Zwischenfrüchte, die zu einer Verringerung der Biomasse der Beikräuter führen, auch eine Verringerung der Samenproduktion bewirken (KRUIDHOF et al., 2008). Ferner kann die Förderung von samenfressenden Prädatoren durch den Zwischenfruchtanbau eine

Verringerung der Beikrautsamenbank bewirken (TEASDALE et al., 2007). Darüber hinaus können manche Zwischenfruchtarten sowohl während ihres Wachstums als auch in abgestorbenem Zustand durch die Abgabe allelopathischer Substanzen eine Beikraut unterdrückende Wirkung haben. Dies ist z. B. für Grünroggen und Hafer (ALTIERI et al., 2011), aber auch für Lupine, Luzerne und Raps (KRUIDHOF et al., 2008) bekannt.

Auswirkungen der Saatstärke und der Samengröße auf die Beikrautkontrolle

Eine höhere Saatstärke kann eine höhere Biomasseproduktion zur Folge haben. In einer Studie von BRENNAN und BOYD (2012) war dies der Fall für eine Leguminosen-Roggen-Mischung (bestehend aus 10% Roggen, 35% Ackerbohne, 25% Erbse, 15% Sommerwicke und 15% Purpurwicke (*V. benghalensis*)). Es wurde die einfache mit der dreifachen Saatstärke verglichen (einfache Saatstärke 140 kg ha⁻¹); die Verdreifachung führte zu einer ungefähr 2,7-fach höheren Bestandesdichte. Die höhere Bestandesdichte resultierte in einer höheren Biomasseproduktion vor allem der legumenen Mischungspartner. Auf die Biomasseproduktion von Grünroggen (einfache Saatstärke 90 kg ha⁻¹) und einer Senfmischung (einfache Saatstärke 11 kg ha⁻¹) hatte die Verdreifachung der Saatstärke jedoch kaum einen Effekt (BRENNAN und BOYD, 2012).

Allerdings ist es auch möglich, dass eine höhere Saatstärke zwar nicht zu einer höheren Biomasse führt, aber zu einer höheren Bodendeckung in einem frühen Entwicklungsstadium der Zwischenfrucht, was einen positiven Effekt für die Beikrautkontrolle hat (RYAN et al., 2011; MIRSKY et al., 2013). In der Studie von RYAN et al. (2011) wurden drei verschiedene Saatstärken von Grünroggen verglichen: 90, 150 und 210 kg ha⁻¹. Die höhere Saatstärke führte nicht zu einer höheren Biomasse des Grünroggens, jedoch zu einer reduzierten Biomasse des Beikrauts. Besonders im Stadium der Keimung sind die Beikräuter sehr konkurrenzempfindlich. In diesem Stadium genügen schon geringe Deckungsgrade von Zwischenfrüchten, um einen Konkurrenzeffekt zu erzielen. Wachsen die Beikräuter über dieses konkurrenzempfindliche Stadium hinaus, nimmt der Bekämpfungserfolg rapide ab (KOLBE et al., 2004). Aus diesem Grund kann außer einer höheren Saatstärke der Anbau von großkörnigen Zwischenfruchtarten im Vergleich zu kleinsamigen Zwischenfruchtarten einen Vorteil in der Beikrautunterdrückung haben. So erreichten in Versuchen von UCHINO et al. (2011) großkörnige Zwischenfruchtarten früher eine gute Bodendeckung und damit eine bessere Beikrautunterdrückung als feinsamige Arten. Dies führen die Autoren zum einen auf die größere Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen der großkörnigen Arten zurück, zum anderen auf den größeren Deckungsgrad pro Keimpflanze (UCHINO et al., 2011).

Kombination von Zwischenfruchtanbau mit mechanischer Beikrautregulierung

Eine aktive Beikrautregulierung durch eine flache, meist mehrmalige Bodenbearbeitung vor der Aussaat der Zwi-

schenfrüchte oder der nächsten Hauptfrucht ist bei pfluglos arbeitenden Landwirten ein bewährtes Verfahren (WILHELM, 2011). Dieses Vorgehen wird auch „falsches Saatbett“ genannt, da im Boden befindliche Beikrautsamen zum Keimen angeregt werden. Auch für das Bekämpfen von Wurzelbeikräutern ist dieses Vorgehen hilfreich. So ist eine mehrmalige flache Bearbeitung besonders wichtig, wenn sich *Cirsium arvense* auf der Fläche befindet (WILHELM, 2011). Bei diesem Verfahren muss allerdings auf Zwischenfrüchte zurückgegriffen werden, die sich für einen späten Saattermin eignen (KRUIDHOF et al., 2008).

Nach einer guten Bodenvorbereitung erübrigen sich in der Regel direkte Regulierungsmaßnahmen (KOLBE et al., 2004).

Soll nach Zwischenfrüchten in einer im Mulchsaatverfahren gesäten Hauptfrucht eine mechanische Beikrautregulierung betrieben werden, ist der herkömmliche Striegel schon ab einer Mulchbedeckung von 16% dafür ungeeignet (HÄNSEL, 2010). Ein Rollstriegel, dessen Wirkung mehr auf einem Verschüttungseffekt als auf einem Ausreißen der Beikräuter beruht, ist dagegen für den Einsatz in Mulchsaaten aufgrund seiner Unempfindlichkeit gegenüber Pflanzenrückständen auf der Bodenoberfläche gut geeignet (RUMPLER, 2011).

Geeignete Zwischenfruchtarten zur Beikrautkontrolle

Die wichtigsten Merkmale der Zwischenfrüchte für eine effektive Beikrautunterdrückung sind eine gute Bodendeckung und eine schnelle Jugendentwicklung. Beim Vergleich von monokotylen Arten mit Leguminosen in einer Studie von NELSON et al. (1991) zeigte sich in beiden Eigenschaften eine Überlegenheit der monokotylen Arten. In Versuchen von STADLER et al. (2009) bedeckten Brassicaceae, monokotyle Arten und Standard-Saadmischungen den Boden schneller und produzierten mehr Biomasse als Leguminosen und andere dikotyle Arten. Eine schnelle Jugendentwicklung kann die wesentliche Eigenschaft für die Beikrautunterdrückung sein; bei einer Grünroggen-Zwischenfrucht erwies sie sich als noch wichtiger als eine hohe Biomasseproduktion (BÄRBERI und MAZZONCINI, 2001). Die grundsätzlicheren Aussagen von ANDERSEN et al. (2007) zu Wettbewerbsvorteilen durch frühe Keimung und Auflaufen unterstützen dies.

Bei einem Anbau der Zwischenfrucht vor einer Sommerkultur sollte sie idealerweise sowohl im Herbst als auch im Frühjahr eine Beikraut unterdrückende Wirkung haben. In einer Studie von KRUIDHOF et al. (2008) reduzierte Ölettrich (TM zwischen 35 und 72 dt ha⁻¹) die Beikrautbiomasse im Herbst stark, war aber nicht effektiv in der Beikrautkontrolle im Frühjahr. Weiße Lupine hatte eine sehr schwache Konkurrenzkraft im Herbst, reduzierte aber das Aufkommen von Beikräutern im Frühjahr vermutlich durch die Abgabe allelopathischer Substanzen beträchtlich (KRUIDHOF et al., 2008). Jedoch kann eine gute Konkurrenzkraft im Herbst allein schon durch eine Verminderung des Beikrautsamenaufkommens eine positive Wirkung auf das Anbausystem zeigen.

In einer anderen Studie zeigte jedoch gerade Ölrettich (TM zwischen 32 und 55 dt ha⁻¹) auch im Frühjahr eine gute Beikraut unterdrückende Wirkung (LOUNSBURY und WEIL, 2014). Die Autoren dieser Studie sahen es als Vorteil, dass Ölrettich eher kleine Mengen an Biomasse hinterlässt, die daher nicht schwierig handzuhaben sind. Als weiteren Vorzug von Ölrettich gaben sie an, dass er leicht durch Abmähen zum Absterben gebracht werden kann, falls er nicht vollständig abgefroren ist.

Auch in mehreren anderen Studien zeigten sich Brassica-Arten wie Gelbsenf und Ölrettich vielversprechend (STADLER et al., 2009; BRUST et al., 2011; DORN et al., 2013; WITTEWERT et al., 2013; BRUST et al., 2014a). Sommerwicke erzielte in verschiedenen Studien ebenfalls gute Ergebnisse (DORN et al., 2011, WITTEWERT et al., 2013; GROSSE et al., 2014a, 2014b). Die in Deutschland noch wenig angebauten Zwischenfrüchte Tatarischer Buchweizen (*Fagopyrum tataricum* L. Gaertn.) und Futterrettich (*Raphanus sativus* L. var. *Longipinnatus*) haben das Potenzial für eine schnelle Bodenbedeckung und hohe Biomasseproduktion und eine damit einhergehende gute Beikrautkontrolle (BRUST et al., 2014a). Eine in Deutschland ebenfalls relativ neue Zwischenfruchtart ist der Rau- oder Sandhafer (*Avena strigosa* Schreb.). Bedingt durch sein gutes Wurzelwachstum ist er konkurrenzstark gegenüber Beikräutern (BRUST et al., 2011; BRUST und GERHARDS, 2012).

Anbau von Zwischenfruchtmischungen

Grundsätzlich bieten Artenmischungen Vorteile für den Anbau, da sie sich resilienter gegenüber Klimaschwankungen, Witterungseinflüssen und Managementfehlern erweisen und daher eine höhere Ertragsstabilität haben (FINCKH, 2008; WORTMAN et al., 2012; SZERENCSEI und ERHART, 2015). Das mögliche Aussaatfenster und die Biomasserträge lassen sich durch den Anbau von Mischungen erhöhen (SCHMIDT und GLÄSER, 2013). Ferner kann die Nährstoffmobilisation in verschiedenen Bodentiefen und deren Konservierung optimiert werden (SCHMIDT und GLÄSER, 2013). Auch für die Beikrautunterdrückung zeigen sich Vorteile, wenn sich in der Mischung schnellkeimende sowie frostunempfindlichere Arten befinden (BRUST et al., 2014b; SCHMIDT und GLÄSER, 2013). Eine ausgeklügelte Zusammensetzung einer Zwischenfruchtmischung kann weitere Vorteile sowohl für das N-Management als auch für die Beikrautunterdrückung bieten.

Der Anbau von Mischungen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen wird von verschiedenen Seiten empfohlen (SAINJU, 1997; SAINJU et al., 2002; RINNOFNER et al., 2005a; RINNOFNER et al., 2005b; SAINJU et al., 2007; DABNEY et al., 2007; CAMPIGLIA et al., 2011; SCHMIDT und GLÄSER, 2012). Leguminosen eignen sich besser dafür, die Nachfrucht mit N zu versorgen, während Nichtleguminosen besser geeignet sind, Nitratauswaschung zu verhindern. Durch die langsamere Mineralisierung der Nicht-Leguminosen im Vergleich zur Leguminose kann es zu einer längerfristigen Vorfruchtwirkung kommen (BECKMANN, 1998). Die Leguminosenpartner in einer Mischung

vermindern die Konkurrenz um N_{min}. Rankenden Leguminosen können aufrecht stehende Arten als Stützfrucht dienen. Eine ausgewogene Mischung kann die Vorteile der verschiedenen Arten bei im Vergleich zu Leguminosen eher kostengünstigerem Saatgut in sich vereinen (BECKMANN, 1998; SCHMIDT und GLÄSER, 2013).

Das Wachstum einer Art in einer Mischung muss jedoch nicht zwangsläufig dem in Reinkultur entsprechen, und je nach Zusammensetzung der Mischung können sich eine andere N-Mineralisierung, N-Aufnahme und ein anderer Biomassertrag ergeben. Die oberirdische Architektur der Pflanzen muss zusammenpassen und die Wurzelwerke der Mischungspartner sollten sich ergänzen. Außerdem muss die Mischung für die Fruchtfolge und für die angestrebten Ziele (hier N-Akkumulation und Beikrautunterdrückung) geeignet sein. Ferner haben die Arten bezüglich des Aussaatzeitpunkts und der Saatechnik unterschiedliche Ansprüche. Daher wird für die erfolgreiche Zusammenstellung von Mischungen ein großes Fachwissen benötigt. Zwischenfruchtanbau von einer Zwischenfruchtart in Reinkultur ist in der Ökologischen Landwirtschaft in Europa immer noch weit verbreitet (PEIGNÉ et al., 2014). Der zusätzliche Nutzen von fachkundig zusammengestellten Zwischenfruchtmischungen sollte gegenüber Landwirten verstärkt kommuniziert werden. Übersichtliche Kriterien, welche Arten zu welchem Zweck sinnvoll in Mischungen zusammengestellt werden können und welche Mischungen zu welchen Fruchtfolgen passen, sollten für Landwirte, die selber mischen wollen, zur Verfügung stehen. Bemühungen dieser Art werden teilweise von Beratern, Landwirtschaftskammern, Landes- und Anbauverbänden unternommen. Auch finanzielle Anreize können einer weiteren Verbreitung von Zwischenfruchtmischungen dienen und einen eventuellen Mehraufwand durch das Zusammenstellen der Mischung oder eventuell höhere Ausgaben durch den Kauf einer fertigen Mischung ausgleichen.

Schlussfolgerungen

Sowohl bei Leguminosen als auch bei nicht-legumen Arten hängt die Höhe der N-Aufnahme weitgehend von der Biomasseproduktion ab. Das C/N-Verhältnis beeinflusst den Verlauf der Mineralisierung. Die Wahl des Einarbeitungszeitpunkts kann steuernd darauf einwirken.

Insbesondere eine schnelle Bodendeckung, aber auch eine hohe Biomasseproduktion der Zwischenfrüchte sind ausschlaggebend für ein gutes Beikrautunterdrückungsvermögen.

Mischungen können mehr Sicherheit im Auflaufen und in der Biomasseproduktion bieten; daher bieten sie gegenüber dem Anbau einer Reinkultur Vorzüge hinsichtlich der N-Aufnahme und Beikrautunterdrückung.

Forschungsbedarf besteht bezüglich der Zusammenstellung optimaler Mischungen für verschiedene Standortbedingungen. Auch zur Bestimmung des Einflusses der Saatechnik auf die Ertragssicherheit könnte weitere Forschung sinnvoll sein.

Literatur

- ALTIERI, M.A., M.A. LANA, H.V. BITTENCOURT, A.S. KIELING, J.J. COMIN, P.E. LOVATO, 2011: Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Sustainable Agriculture* **35** (8), 855-869.
- ANDERSEN, M.K., H. HAUGGAARD-NIELSEN, J. WEINER, E. STEEN JENSEN, 2007: Competitive dynamics in two- and three-component intercrops. *Journal of Applied Ecology*, **44**, 545-551.
- BAGGS, E.M., C.A. WATSON, R.M. REES, 2000: The fate of nitrogen from incorporated cover crop and green manure residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **56** (2), 153-163.
- BÄRBERI, P., 2002: Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research* **42** (3), 177-193.
- BÄRBERI, P., M. MAZZONCINI, 2001: Changes in weed community composition as influenced by cover crop and management system in continuous corn. *Weed Science*, **49** (4): 491-499.
- BARESEL, J.P., H.-J. REENTS, W. SCHENKEL, 2003: Screening alternativer Leguminosenarten auf ihre Eignung zur Gründüngung und zum Mischanbau im Ökologischen Landbau. Abschlussbericht. Online verfügbar unter www.orgprints.org/8353.
- BECKMANN, E., 1998: Zum Wert von *Vicia sativa* L. und *Trifolium resupinatum* L. unter variierenden Bedingungen im Zwischenfruchtanbau. Dissertation. Justus-Liebig-Universität, Gießen. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung.
- BLOMBÄCK, K., H. ECKERSTEN, E. LEWAN, H. ARONSSON, 2003: Simulations of soil carbon and nitrogen dynamics during seven years in a catch crop experiment. *Agricultural Systems* **76** (1), 95-114.
- BOND, W., A. GRUNDY, 2001: Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research* **41** (5), 383-405.
- BOSTRÖM, U., 1999: Type and time of autumn tillage with and without herbicides at reduced rates in southern Sweden. *Soil and Tillage Research* **50** (3-4), 271-281.
- BRENNAN, E.B., N.S. BOYD, 2012: Winter cover crop seeding rate and variety affects during eight years of organic vegetables: I. Cover crop biomass production. *Agronomy Journal* **104** (3), 684-698.
- BRUST, J., W. CLAUPEIN, R. GERHARDS, 2014a: Growth and weed suppression ability of common and new cover crops in Germany. *Crop Protection* **63**, 1-8.
- BRUST, J., R. GERHARDS, 2012: Lopsided oat (*Avena strigosa*) as a new summer annual cover crop for weed suppression in Central Europe. In: H. NORDMEYER und L. ULBER (Hg.): Tagungsband 25. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. Braunschweig, 13.-15.3.2012. Julius-Kühn-Archiv, **434**, 257-264.
- BRUST, J., R. GERHARDS, T. KARANISA, L. RUFF, A. KIPP, 2011: Warum Untersaaten und Zwischenfrüchte wieder Bedeutung zur Unkrautregulierung in Europäischen Ackerbausystemen bekommen. *Gesunde Pflanzen* **63** (4), 191-198.
- BRUST, J., J. WEBER, R. GERHARDS, 2014b: Do cover crop mixtures have the same ability to suppress weeds as competitive monoculture cover crops? In: H. NORDMEYER und L. ULBER (Hg.): Tagungsband 26. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. Braunschweig, 11.-13.03.2014. Julius-Kühn-Archiv, **443**, 422-430.
- BÜCHI, L., C.-A. GEBHARD, F. LIEBISCH, S. SINAJ, H. RAMSEIER, R. CHARLES, 2015: Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil* **393** (1/2), 163-175.
- CAMPIGLIA, E., R. MANCINELLI, E. RADICETTI, S. MARINARI, 2011: Legume cover crops and mulches: effects on nitrate leaching and nitrogen input in a pepper crop (*Capsicum annuum* L.). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **89** (3), 399-412.
- CARR, P.M., P. MÄDER, N.G. CREAMER, J.S. BEEBY, 2012: Editorial: Overview and comparison of conservation tillage practices and organic farming in Europe and North America. *Renewable Agriculture and Food Systems* **27** (01), 2-6.
- DABNEY, S.M., J.A. DELGADO, D.W. REEVES, 2007: Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **32** (7-8), 1221-1250.
- DORN, B., W. JOSSI, M. VAN DER HELJDEN, 2011: Leguminosen als Zwischenbegrünung im ökologischen Ackerbau mit konservierender Bodenbearbeitung. In: LEITHOLD G., K. BECKER, C. BROCK, S. FISCHINGER, A.-K. SPIEGEL, K. SPORY et al. (Hg.): Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis. 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Gießen, 15.-18. März 2011. Dr. Köster, 32-35.
- DORN, B., M. STADLER, M. VAN DER HELJDEN, B. STREIT, 2013: Regulation of cover crops and weeds using a roll-chopper for herbicide reduction in no-tillage winter wheat. *Soil and Tillage Research* **134**, 121-132.
- DRINKWATER, L.E., R.R. JANKE, L. ROSSONI-LONGNECKER, 2000: Effects of tillage intensity on nitrogen dynamics and productivity in legume-based grain systems. *Plant and Soil* **227** (1/2), 99-113.
- FINCKH, M.R., 2008: Reaktionsmöglichkeiten auf den Klimawandel durch Pflanzenzüchtung und Sortenwahl. In: U. KLÖBLE (Hg.): Klimawandel und Ökolandbau. Situation, Anpassungsstrategien und Forschungsbedarf. KTBL Schrift **472**, S. 160-175.
- GROSSE, M., T. HAASE, J. HEß, 2014a: Influence of reduced tillage and green manures on weed emergence and yield in organic farming. In: G. RAHMANN und U. AKSOY (Hg.): Building Organic Bridges; Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference, Bd. 2. Istanbul, 13.-15.10.2014. Thünen Report **20**, 411-414.
- GROSSE, M., T. HAASE, J. HEß, 2014b: Wirkung von reduzierter Bodenbearbeitung und Gründüngung im Ökologischen Landbau auf den Beikrautbesatz. In: H. NORDMEYER und L. ULBER (Hg.): Tagungsband 26. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. Braunschweig, 11.-13.03.2014. Julius-Kühn-Archiv, **443**, 502-506.
- GROSSE, M., HEß, J., 2015: Der kurzfristige Einfluss von drei Zwischenfruchtarten und zwei verschiedenen Bodenbearbeitungen auf Frühjahrs-NO₃-N des Bodens und Ertrag der Hauptfrucht Hafer. In: A.M. HÄRING, B. HÖRNING, R. HOFFMANN-BAHNSEN, H. LULEY, V. LUTHARD, J. PAPE und G. TREI (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg: Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Eberswalde, 17.-20.03.2015. Berlin: Dr. Köster, 84-87.
- GRUBER, H., U. THAMM, 2005: Eignung von ausgewählten Zwischenfruchtgemengen für Anbau und Verfütterung im ökologischen Landbau, Nr. 4/04. Forschungsberichte der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern.
- HÄNSEL, M., 2010: Den Boden im Öko-Landbau ohne Pflug bearbeiten. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 10.11.2010. Online verfügbar unter <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/328,4f125718-237d-eebf-5ee314cc03f54014~pdf.html>.
- HEß, J., 1989: Kleeerasumbruch im Organischen Landbau: Stickstoffdynamik im Fruchtfolgeglied Kleeeras - Kleeeras - Weizen - Roggen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn. Abteilung Bodenbearbeitung und Angewandte Bodenphysik.
- KANDERS, J.M., C. BERENDONK, C. FRITZ, C. WATSON, F. WICHERN, 2017: Catch crops store more nitrogen below-ground when considering Rhizodeposits. *Plant and Soil*, First Online, doi:10.1007/s11104-017-3259-0.
- KOLBE, H., M. SCHUSTER, M. HÄNSEL, A. GRÜNBECK, I. SCHLIEßER, A. KÖHLER et al., 2004: Zwischenfrüchte im Ökologischen Landbau. Hg. v. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Leipzig.
- KÖNIG, U.J., 1996: Zwischenfruchtanbau von Leguminosen. Abschlussbericht des Forschungsprojektes: Verfahren zur Minimierung der Nitratausträge und Optimierung des N-Transfers in die Folgefrüchte beim Zwischenfruchtanbau von Leguminosen. Schriftenreihe Institut für Biologisch-Dynamische Forschung Darmstadt, **6**.
- KÖPKE, U., 2003: Spezifika der Bodenbearbeitung und Unkrautregulierung im Ökologischen Landbau aus Sicht der Wissenschaft und der Praxis. In: Florian Kloepper (Hg.): Bodenbearbeitung und Unkrautregulierung im Ökologischen Landbau. Darmstadt: KTBL, S. 7-22.
- KRUIDHOF, H.M., L. BASTIAANS, M.J. KROPFF, 2008: Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. *Weed Research* **48** (6), 492-502.
- LEAVITT, M.J., C.C. SHEAFFER, D.L. WYSE, D.L. ALLAN, 2011: Rolled winter rye and hairy vetch cover crops lower weed density but reduce vegetable yields in no-tillage organic production. *HortScience* **46** (3), 387-395.
- LOUNSBURY, N.P., R.R. WEIL, 2014: No-till seeded spinach after winterkilled cover crops in an organic production system. *Renewable Agriculture and Food Systems* **30** (5), 473-485.
- LÜTKE ENTRUP, N., 2001: Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau. Gelsenkirchen: Thomas Mann.
- LUTMAN, P.J.W., 2002: Estimation of seed production by *Stellaria media*, *Sinapis arvensis* and *Tripleurospermum inodorum* in arable crops. *Weed Research* **42** (5), 359-369.
- MIRSKY, S.B., M.R. RYAN, J.R. TEASDALE, W.S. CURRAN, S.C. REBERG-HORTON, J.T. SPARGO et al., 2013: Overcoming weed management challenges in cover crop-based organic rotational no-till soybean production in the Eastern United States. *Weed Technology* **27** (1), 193-203.
- MÖLLER, K., H.-J. REENTS, 2009: Effects of various cover crops after peas on nitrate leaching and nitrogen supply to succeeding winter

- wheat or potato crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172** (2), 277-287.
- MUELLER, T., K. THORUP-KRISTENSEN, 2001: N-Fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation. *Biological Agriculture & Horticulture* **18** (4), 345-363.
- NELSON, W.A., B.A. KAHN, B.W. ROBERTS, 1991: Screening Cover Crops for Use in Conservation Tillage Systems for Vegetables Following Spring Plowing. *HortScience* **26** (7), 860-862.
- NIEDER, R., 1998: Bodenbearbeitung und Nährstoffaustrag. In: KTBL (Hg.): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Schlussfolgerungen für gute fachliche Praxis. KTBL-Arbeitspapier, **266**, 91-116.
- PEIGNÉ, J., B.C. BALL, J. ROGER-ESTRADE, C. DAVID, 2007: Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use & Management* **23** (2), 129-144.
- PEIGNÉ, J., M. CASAGRANDE, C. DAVID, F.X. SANS, J.M. BLANCO-MORENO, J.M. COOPER et al., 2014: Diversity of conservation agriculture practices among European organic farmers. In: G. RAHMANN und AKSOY U. (Hg.): Building Organic Bridges; Proceedings of the 4th ISOFAR Scientific Conference, Bd. 1. Istanbul, 13.-15.10.2014. Thünen Report **20**, 287-290.
- PRICE, A.J., J.K. NORSWORTHY, 2013: Cover crops for weed management in southern reduced-tillage vegetable cropping systems. *Weed Technology* **27** (1), 212-217.
- RAYNS, F.W., E.K.M. LENNARTSSON, 1995: The nitrogen dynamics of winter green manures. In: H. F. COOK und H. C. LEE (Hg.): Soil Management in Sustainable Agriculture. Proceedings of the Third International Conference on Sustainable Agriculture. Wye College Press, 308-311.
- REBERG-HORTON, S.C., J.M. GROSSMAN, T.S. KORNECKI, A.D. MELJER, A.J. PRICE, G.T. PLACE, T.M. WEBSTER, 2012: Utilizing cover crop mulches to reduce tillage in organic systems in the southeastern USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* **27** (1), 41-48.
- REENTS, H.-J., K. MÖLLER, 2001: Stickstoffmanagement im ökologischen Landbau unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Zwischenfrüchten. In: H.-J. Reents (Hg.): Von Leit-Bildern zu Leit-Linien. 6. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Berlin, 06.-08.03.2001. Berlin: Dr. Köster, 179-192.
- RENIUS, W., H. KEES, E. LÜTKE ENTRUP, N. LÜTKE ENTRUP, 1992: Zwischenfruchtbaue zur Futtergewinnung und Gründüngung. Ein Baustein zur Bodenfruchtbarkeit und zum Umweltschutz. 3. Aufl. Frankfurt, Main: DLG-Verlag.
- RINNOFNER, T., R. FARTHOFER, J.K. FRIEDEL, G. PIETSCH, W. LOISKANDL, B. FREYER, 2005a: Stickstoffaufnahme und Biomassertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Bodennitratgehalte und die Folgekultur unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet. In: J. HEß und G. RAHMANN (Hg.): Ende der Nische. 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Kassel, 01.-04.03.2005.
- RINNOFNER, T.J.K. FRIEDEL, R. FARTHOFER, G. PIETSCH, B. FREYER, 2005b: Effizienz verschiedener Zwischenfruchtvarianten unterschiedlich hohen Leguminosenanteils in der Reduktion der Mineralstickstoffgehalte im Boden unter pannonischen Standortbedingungen. In: A. KÄMPF, W. CLAUPEIN, S. GRAEFF und W. DIEPENBROCK (Hg.): Wasser und Pflanzenbau - Herausforderungen für zukünftige Produktionssysteme. 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Wien, 27.-29.09.2005. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften **17**, 391-392.
- RUMPLER, J., 2011: Längs fahren - quer striegeln: Der Rollstriegel für Reihen- und Flächenkulturen. In: B. WILHELM und O. HENSEL (Hg.): Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Witzhausen: DITSL, 157-163.
- RYAN, M.R., W.S. CURRAN, A.M. GRANTHAM, L.K. HUNSBERGER, S.B. MIRSKY, D. MORTENSEN et al., 2011: Effects of seeding rate and poultry litter on weed suppression from a rolled cereal rye cover crop. *Weed Science* **59** (3), 438-444.
- SAINJU, U.M., 1997: Winter cover crops for sustainable agricultural systems: Influence on soil properties, water quality, and crop yields. *HortScience* **32** (02), 21-28.
- SAINJU, U.M., B. SINGH, W. WHITEHEAD, 2002: Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil and Tillage Research* **63** (3-4), 167-179.
- SAINJU, U.M., B.P. SINGH, B.P., W.F. WHITEHEAD, S. WANG, 2007: Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. *Agronomy Journal* **99** (3), 682-691.
- SCHELLER, E., 1993: Die Stickstoff-Versorgung der Pflanzen aus dem Stickstoff-Stoffwechsel des Bodens. Ein Beitrag zu einer Pflanzenernährungslehre des organischen Landbaus. Gesamthochsch., Diss.-Kassel, 1993. Weikersheim: Margraf, Ökologie & Landwirtschaft, 4.
- SCHMIDT, H., 1997: Viehlose Fruchtfolge im ökologischen Landbau: Auswirkungen systemeigener und systemfremder Stickstoffquellen auf Prozesse im Boden und die Entwicklung der Feldfrüchte. 161 S.
- SCHMIDT, A., H. GLÄSER, 2012: Anbau von Zwischenfrüchten. Auswertung der Versuchsanlagen 2011/12 in Sachsen. Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007-2013. LfULG, Dresden.
- SCHMIDT, A., H. GLÄSER, 2013: Anbau von Zwischenfrüchten. Auswertung der Versuchsanlagen 2012/13 in Sachsen. Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007-2013. LfULG, Dresden.
- SCHMIDTKE, K., 2008: How to optimise symbiotic nitrogen fixation in organic crop rotations. ISOFAR Conference 'Organic Agriculture in Asia'. Dankook University, Republic of Korea, 13.03.2008. Online verfügbar unter <http://orgprints.org/13272/>, zuletzt geprüft am 15.01.2015.
- SHRESTHA, A., S.Z. KNEZEVIC, R.C. ROY, B.R. BALL-COELHO, C.J. SWANTON, 2002: Effect of tillage, cover crop and crop rotation on the composition of weed flora in a sandy soil. *Weed Research* **42** (1), 76-87.
- STADLER, M., U. ZIHLMANN, C. SCHERRER, W. JOSSI, B. STREIT, 2009: Verschiedene Gründüngerpflanzen - Anbaueignung und Unkrautunterdrückung im Direktsaatssystem vor Winterweizen. In: J. MAYER, T. ALFÖLDI, F. LEIBER, D. DUBOIS, P. FRIED, F. HECKENDORN et al. (Hg.): Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel, Bd. 1. Berlin: Köster, 131-132.
- SZERENCSEITS, M., E. ERHART, 2015: Biogaserzeugung ohne Flächenkonkurrenz auf Basis von Zwischenfrüchten, Klee gras und Reststoffen. In: A. M. HÄRING, B. HÖRNING, R. HOFFMANN-BAHNSEN, H. LULEY, V. LUTHARD, J. PAPE und G. TREI (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg: Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Eberswalde, 17.-20.03.2015. Berlin: Dr. Köster, 256-259.
- TEASDALE, J.R., L.O. BRANDSÆTER, A. CALEGARI, F. SKORA NETO, 2007: Cover Crops and Weed Management. In: M. K. UPADHYAYA und R. E. BLACKSHAW (Hg.): Non-chemical weed management. Principles, concepts, and technology. Cambridge, MA: CABI, 49-64.
- THORUP-KRISTENSEN, K., 1994: The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertilizer Research* **37**, 227-234.
- THORUP-KRISTENSEN, K., 2001: Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and Soil* **230**, 185-195.
- THORUP-KRISTENSEN, K., D.B. DRESBØLL, 2010: Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop. *Soil Use and Management* **26** (1), 27-35.
- THORUP-KRISTENSEN, K., J. MAGID, L. STOUTMANN JENSEN, 2003: Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* **79**, 227-302.
- THORUP-KRISTENSEN, K., N.E. NIELSEN, 1998: Modelling and measuring the effect of nitrogen catch crops on the nitrogen supply for succeeding crops. *Plant and Soil* **203**, 79-89.
- UCHINO, H., K. IWAMA, Y. JITSUYAMA, K. ICHIYAMA, E. SUGIURA, T. YUDATE, 2011: Stable characteristics of cover crops for weed suppression in organic farming systems. *Plant Production Science* **14** (1), 75-85.
- URBATZKA, P., R. GRAß, T. HAASE, C. SCHÜLER, J. HEß, 2009: Fate of legume-derived nitrogen in monocultures and mixtures with cereals. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **132** (1-2), 116-125.
- WENDLING, M., L. BÜCHI, C. AMOSSÉ, S. SINAJ, A. WALTER, R. CHARLES, 2016: Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant and Soil* **409** (1-2), 419-434.
- WILHELM, B., 2011: Beikrautmanagement ohne Pflug - Erfahrungen aus der Praxis. In: B. WILHELM und O. HENSEL (Hg.): Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Witzhausen: DITSL, 69-75.
- WITTWER, R., B. DORN, W. JOSSI, U. ZIHLMANN, M. VAN DER HELDEN, 2013: Zwischenfrüchte als wichtiges Puzzleteil für den pfluglosen ökologischen Landbau. In: D. NEUHOF, C. STUMM, S. ZIEGLER, G. RAHMANN, U. HAMM und U. KÖPKE (Hg.): Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung. 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Bonn, 05.-08.03.2013. Berlin: Dr. Köster, 46-49.
- WORTMAN, S.E., C.A. FRANCIS, M.L. BERNARDS, R.A. DRUBER, J.L. LINDQUIST, 2012: Optimizing cover crop benefits with diverse mixtures and an alternative termination method. *Agronomy Journal* **104** (5), 1425-1435.